

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет кораблебудування**  
**імені адмірала Макарова**  
**Херсонська філія**

Енерготехнічний факультет  
Кафедра автоматики та електрообладнання

**Рекомендовано до захисту**  
Завідувач кафедри автоматики та  
електрообладнання  
Михаліченко П.Є.  
(підпис) (прізвище ініціали)  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Розробка системи керування електропривода суднового  
сепаратора»

Здобувач б курсу, групи 6367м  
за спеціальністю: 141 «Електроенергетика  
Електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва спеціальності)  
Освітньо-професійна програма:  
«Експлуатація суднових автоматизованих  
(назва)  
систем»

Жоля Ю.О. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник Кириченко О.С. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Гаврилов С.О. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

м. Херсон - 2020 року

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

Херсонська філія

( повне найменування вищого навчального закладу )

Інститут, факультет, відділення Енерготехнічний

Кафедра, циклова комісія Автоматики та електрообладнання

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий, (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр)

Спеціальність 141 «Електроенергетика електротехніка, та електромеханіка»

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма «Експлуатація суднових автоматизованих

(назва)

систем»

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри автоматики  
та електрообладнання**

Михаліченко П.Є.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Жоля Юліан Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка системи керування електропривода суднового сепаратора

Керівник роботи: Кириченко О.С., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_

2. Строк подання здобувачем роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: були отримані в ході проходження науково-педагогічної практики та експлуатаційної, переддипломної практик

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1) Характеристика суднових сепараторів; 2) Виклад загальних підходів і основних методів дослідження; 3) Розрахункова частина, аналіз динаміки системи; 4) Запобігання забруднення з суден відповідно до конвенції МАРПОЛ 73/78.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
презентація в електронному вигляді

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Характеристика суднових сепараторів		
2	Виклад загальних підходів і основних методів дослідження		
3	Вибір елементів і аналіз динаміки системи		
4	Запобігання забруднення з суден відповідно до конвенції МАРПОЛ 73/78		

Здобувач

( підпис )

Жоля Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

( підпис )

Кириченко О.С.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Об'єм пояснювальної записки становить 90 аркушів, вона містить 4 розділи, 37 рисунків, 6 таблиць, 17 найменувань в списку використаної літератури. Мультимедійна презентація представлена на 12 слайдах.

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в розробленій системі керування електропривода суднового сепаратора.

Предметом дослідження є показники якості керування в розробленій системі керування електропривода суднового сепаратора.

Метою роботи є розробка системи керування електропривода суднового сепаратора.

В роботі розроблено систему керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples). Використано систему скалярного керування, наведено її функціональну і структурну схеми. В електроприводі суднового сепаратора «Гравітроль-1000» використано новий приводний асинхронний двигун RA132SB2 потужністю 7,5 кВт з частотою обертів 2890 об/хв, перетворювач частоти MOELLER модель MMX34AA014F0-0 потужністю 7,5 кВт.

В роботі розраховано параметри регуляторів розробленої системи, проведено аналіз динаміки системи. Отримано наступні показники якості керування: перерегулювання – 17 %, час перехідного процесу 0,35 с.

Також, розглянуто матеріали міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 по запобіганню забруднення з суден.

**Ключові слова:** система скалярного керування, автоматизований електропривод, судновий сепаратор «Гравітроль-1000», перехідні процеси, динаміка системи, показники якості керування.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНОВИХ СЕПАРАТОРІВ .....	8
1.1 Сепарація палива та мастила .....	8
1.2 Сепаратори фірми Шарплес (Sharples) .....	12
1.3 Особливості апаратури керування і захисту суднових електроприводів .....	20
2 ВИКЛАД ЗАГАЛЬНИХ ПІДХОДІВ І ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	30
2.1 Структурно-логічна схема дослідження, багатошвидкісні асинхронні двигуни в судновому електроприводі .....	30
2.2 Розробка системи скалярного керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	37
2.3 Робота електропривода суднового сепаратора при зміні напруги .....	43
2.4 Перетворювач частоти MOELLER M-MAX в електроприводі суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	47
3 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ І АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ .....	58
3.1 Розрахунок параметрів приводного асинхронного двигуна суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	58
3.2 Вибір перетворювача частоти електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	62
3.3 Синтез структури та розрахунок регуляторів системи керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	63
3.5 Дослідження динаміки системи керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» .....	68
4 ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ З СУДЕН ВІДПОВІДНО ДО КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 .....	73
4.1 Загальні питання по запобіганню забруднення з суден .....	73
4.2 Очищення льяльних вод .....	74

4.3 Фільтруюче обладнання .....	75
4.4 Шляхи поліпшення роботи фільтруючого обладнання .....	83
4.5 Вимоги конвенції МАРПОЛ 73/78 щодо охорони морського середовища .....	85
ВИСНОВКИ .....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА .....	89

## ВСТУП

Суднові сепаратори широко використовуються на судах морського та річкового флоту. Для сепарації палива і мастила в даний час застосовують два основні типи сепараторів: барабанні сепаратори з частотою обертання барабана  $n=4000-9000$  об/хв і трубчасті  $n=12000-45000$  об/хв. В силу технологічних особливостей більш поширеними у використанні є сепаратори барабанного типу.

Головне призначення суднових сепараторів – відділення води і механічних домішок від палива (або мастила). Принцип роботи всіх суднових сепараторів базується на наявності різниці в густині різних речовин і, отже, відцентрових сил, що виникають під час обертання частинок палива (або мастила), води і механічних частинок.

В переважній більшості електропривод суднових сепараторів є неавтоматизованим. Неавтоматизовані електроприводи суднових сепараторів не можуть забезпечити необхідних показників якості керування, крім того, вони є енергетично неефективними. Останнім часом намітилась тенденція до широкого використання сучасних систем керування електроприводами суднових сепараторів. З урахуванням того, що більшість приводних електродвигунів суднових сепараторів є асинхронними двигунами, актуальними залишаються питання використання асинхронних частотно-регульованих (або частотно-керованих) електроприводів. В таких приводах система керування частотою обертання ротора приводного асинхронного двигуна суднового сепаратора здатна забезпечити сучасні жорсткі вимоги до якості керування, а також є енергоощадною.

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в розробленій системі керування електропривода суднового сепаратора.

Предметом дослідження є показники якості керування в розробленій системі керування електропривода суднового сепаратора.

Метою роботи є розробка системи керування електропривода суднового сепаратора.

В роботі згідно з її метою, вирішуються наступні задачі:

1. Розглянути основні характеристики суднових сепараторів, проаналізувати особливості апаратури керування і захисту суднових електроприводів.

2. Розробити систему керування електропривода суднового сепаратора, виконати аналіз її функціональної та структурної схем.

3. Виконати вибір елементів, дослідити динаміку системи та встановити показники якості керування електропривода суднового сепаратора.

4. Розглянути матеріали міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 по запобіганню забруднення з суден.



## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНОВИХ СЕПАРАТОРІВ

#### 1.1 Сепарація палива та мастила

З метою підвищення рентабельності експлуатації суден для тихохідних двигунів як паливо застосовують топковий мазут, тому підготовка палива для двигуна в суднових умовах має надзвичайно важливе значення.

При проведенні паливопідготовки необхідно враховувати вплив багатьох характеристик палива на роботу силової установки, особливо тих, які в суднових умовах можна поліпшити.

Відомі такі характеристики важких палив:

1. В'язкість. Якість очищення і продуктивність сепаратора багато в чому залежать від в'язкості сепарованого палива. Практика показала, що в'язкість при температурі сепарування не повинна бути вище 2-4° ВУ. В'язкість оцінюється різними одиницями: секунди Сейболта, секунди Редвуд, кінематична в'язкість (сантистокси – сСт), умовна в'язкість (° ВУ). В'язкість палива істотно залежить від температури.

2. Температура спалаху палива. Правила Морського Регістра встановлюють граничну температуру підігріву палива у відкритих системах на 15 °С нижче температури спалаху палива.

3. Вода. Зниження вмісту води в паливі є однією з основних задач сепарування.

4. Коксівність. При сепарування коксівність палива дещо знижується за рахунок виділення частини асфальто-смолистих речовин.

5. Механічні домішки. Під такими розуміють сторонні тіла неорганічного походження. Вони переміщуються під дією відцентрових сил до внутрішніх поверхонь.

Паливо та змащувальні мастила перед їх використанням у дизелі необхідно обробити. Для цього застосовуються відстоювання та підігрів з метою видалення води, грубої та тонкої фільтрації для видалення плоских частинок, а також сепарація.

Відцентровий сепаратор використовується для розділення двох рідин, наприклад, палива та води (або мастила і води), або для розділення рідин та твердих (плоских) частинок, які зустрічаються в мастилі. Розділення цих середовищ прискорюється за допомогою відцентрового апарату та може здійснюватися постійно. Якщо сепаратор призначений для розділення двох рідин, його називають пуріфікатором (очищувачем). Якщо сепаратор вбудований (зібраний) так, що може виділити домішки і невелику кількість води з палива або мастила, то його називаються кларіфікатором (тонким очищувачем-освітлювачем).

Видалення домішок та води з палива надає велике значення для забезпечення доброго згоряння палива. Завдяки видаленню забруднених домішок зі змащувального мастила вдається зменшити зношення деталей і запобігти можливим поломкам. Тому сепарація мастил та палив дуже необхідна.

Процес пуріфікації. У результаті відцентрового розділення двох рідин, таких як паливо та вода, утворюється циліндрична поверхня розділу між ними. Розташування цієї поверхні розділу всередині барабана має дуже велике значення для нормальної ефективної роботи сепаратора. Стійке розташування поверхні розділу фаз підтримується за допомогою застосування регульованих шайб або гравітаційних дисків (тарілок) відповідного діаметра, встановленого на вихідному каналі з сепаратора. Ці кільця і шайби різного діаметра мають в наявності для кожного сепаратора, щоб можна було підібрати шайбу або кільце відповідного розміру в залежності від густини сепарованого палива. Чим менша густина

сепарованого палива, тим більше повинен бути внутрішній діаметр регульованої шайби.

Процес кларіфікації. Він застосовується для очищення палива, яке містить мало або зовсім не містить воду. При цьому видаляються з палива домішки, що накопичились в грязьовій камері, розташованій на периферійних барабанах. Барабан-кларіфікатор має лише одне випускний отвір. Гравітаційні диски тут не застосовуються, так як поверхня розділу рідких фаз не утворюється. Отже, барабан працює з максимальною роздільною здатністю, оскільки на паливо діє максимальні відцентрові сили.

Тарілки барабана. Барабани пуріфікаторів і кларіфікаторів містять кожен по пакету конічних дисків (тарілок). У кожному такому пакеті може бути до 150 тарілок, що відділені одна від одної невеликим зазором (просвітом). Процес видалення домішок і води з палива відбувається між цими тарілками. Ряди центрованих отворів, розташованих у кожній тарілці навколо її зовнішньої кромки, призначені для потрапляння в міжтарілчастий простір брудного палива, тобто палива, що підлягає обробці. Під дією відцентрової сили легкі компоненти (чисте паливо) переміщуються до осі обертання барабана, а вода і домішки (більш важкі компоненти) відкидаються до периферії барабана уздовж нижніх сторін (поверхонь) тарілок.

Періодична робота сепаратора. Деякі сепаратори сконструйовані таким чином, що мають нетривалий період роботи. Потім їх вимикають для очищення відсепарованих домішок (щільних частинок). Після очищення тарілок і видалення шламів з барабана сепаратор вмикають. При такій періодичній роботі використовуються барабани двох різних конструкцій: довгий вузький і короткий широкий барабани. Для сепараторів з вузьким барабаном потрібне очищення після нетривалого періоду роботи. Для цього барабан необхідно розбирати. Очистка такого вузького барабана, що не має пакет тарілок, значно простіша за барабан з тарілками. Сепаратор з широким

барабаном і з тарілками можна чистити на місці, хоча наявні додаткові труднощі в очистці пакетів конічних тарілок.

Безперервна робота сепаратора. Сепаратори з широкими барабанами сучасних конструкцій можуть ефективно працювати протягом тривалого періоду. Це досягається за допомогою викидання (відстрілювання) через певні проміжки часу шламу з барабана. Шлам накопичується по периферії барабана в процесі безперервної його сепарації з палива. Через певні зміни часу шлам вибирається з барабана назовні, перш ніж він почне негативно впливати на процес сепарації палива. На початку процесу викидання шламу (автоматичної очистки барабана) подачу палива в сепаратор зупиняють і паливо, що залишилось в барабані, видаляють промивкою води. Вода заповнює гідравлічну систему, розташовану в нижній частині барабана, і відкриває пружинні клапани. Потім під впливом води рухається вниз нижня частина барабана. У результаті цього відкриваються випускні вікна, що розташовані по периферії барабана в його середній частині. Шлам виштовхується через ці вікна відцентровою силою. Потім під впливом води піднімається рухома частина барабана знову вгору (у вихідне положення). У результаті цього випускні вікна закриваються. Потім в барабан подається вода для відновлення рідинного ущільнення (водяного затвору), необхідного для процесу сепарації. Після цього відновлюють подачу в сепаратор необробленого палива та процес сепарації продовжується.

Викидання шламу триває всього кілька секунд і сепаратор при цьому працює постійно. В існуючих конструкціях сепараторів застосовуються різні способи видалення шламу з барабану, наприклад, повне видалення, часткове керування видаленням і т.д. При частковому керуванні видаленням подачу палива в сепаратор не зупиняють і весь шлам виштовхується. При цьому процес сепарації безперервний. Як би метод сепарації не застосовувався, але сепаратор повинен бути побудований таким чином, щоб процес видалення

шляму здійснювався або вручну, або за допомогою автоматичного програмного регулятора (таймера).

Технічне обслуговування сепаратора. Барабан і пакет тарілок потребують періодичної очистки, якщо сепаратор сконструйований без підвісних поршневих затворів, тобто з несамоочисним барабаном. При розбиранні барабану повинні бути прийняті заходи обережності. Потрібно користуватися лише спеціальним інструментом, призначеним для цієї мети.

Потрібно враховувати, що в деяких деталях сепаратора є різьби лівого обертання (проти годинникової стрілки). Барабан є точно збалансованим пристроєм, що має високу частоту обертання. Тому всі його деталі повинні бути ретельно оглянуті і підігнані.

## **1.2 Сепаратори фірми Шарплес (Sharples)**

Саморозвантажні сепаратори є сепараторами з періодичним розвантаженням, тому що для розвантаження барабана кожен раз доводиться переривати процес обробки. Розвантаження сепаратора відбувається за 3-5 с, але перемикання магістралей палива (мастила) і води може зайняти ще 3-7 хв. Потрібен також деякий час для відновлення числа обертів барабана, яке при розвантаженні кожен раз падає.

Крім цього барабани сепараторів з періодичним розвантаженням мають відносно складну конструкцію з рухомими деталями, що труться, і систему ущільнень, що позначається на надійності роботи сепаратора.

Для усунення перерахованих вище недоліків саморозвантажних сепараторів були сконструйовані соплові сепаратори безперервної дії. Очищення палива в цих сепараторах відбувається таким же чином, як і в конструкціях тарілчастих сепараторів, але розвантаження принципово відрізняється.

На рис. 1.1 показана схема роботи барабана соплового сепаратора. Він може працювати в режимі кларифікатора і пуріфікатора. Принципова відмінність в роботі барабана полягає в тому, що через постійно відкриті сопла 2 в стінках корпусу барабана безперервно викидається суміш води, палива і шламу. Для запобігання втрат палива, яке у великій кількості йде з водою і шламом, ця суміш знову подається на сепарацію (рециркуляцію) в барабан через приймальний канал 1. Безперервно циркулюючи, суміш концентрується, зміст шламу в ній зростає, а кількість палива зменшується. Коли перекачування такої концентрованої суміші стає ускладненим, вона вивантажується з циркуляційної системи в грязьовий танк.

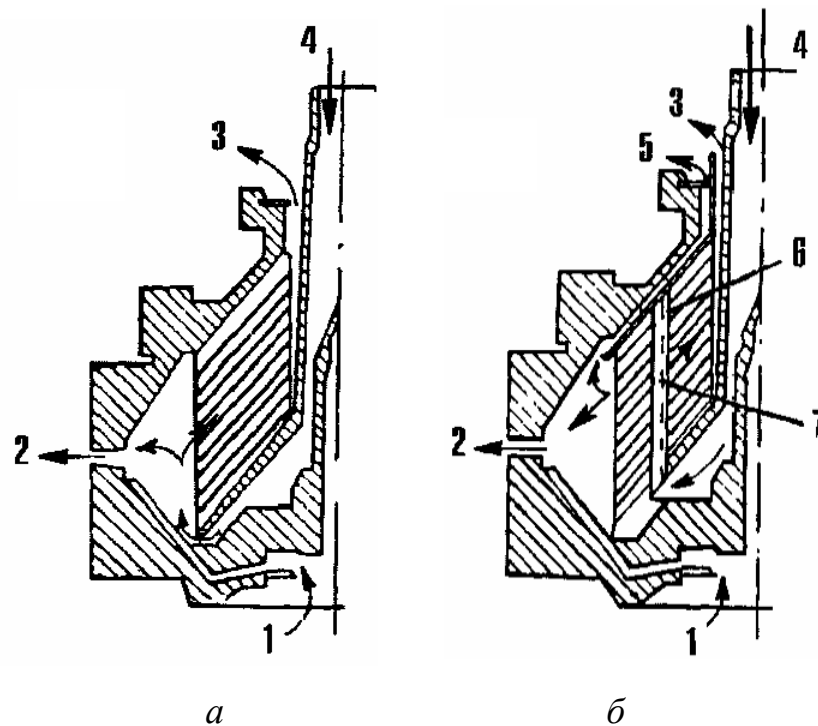


Рисунок 1.1 – Схема роботи барабана соплового сепаратора в режимі кларифікатора (*а*) і пуріфікатора (*б*): 1 – паливо і емульсія на рециркуляцію; 2 – розвантаження з сопел – суміш палива, води і суспензій; 3 – очищене паливо; 4 – брудне паливо на очистку; 5 – відсепарована вода; 6 канали, утворені отворами в тарілках; 7 – поверхня розділу між паливом і водою

Фірма Шарплес (Sharples) розробила конструкцію соплового сепаратора типу "Гравітроль-1000". Принципова схема роботи цього сепаратора представлена на рис. 1.2. Барабан сепаратора не має рухомого дна, а сопла 7 під час роботи залишаються постійно відкритими. Для запобігання витoku сепарованої рідини 2 через сопла 7 передбачено гідравлічне ущільнення, яке здійснюється в такий спосіб. В камеру обертowego барабана безперервно подається вода по каналу 3. Під дією відцентрових сил вона протікає по каналах 6 до периферії барабана і утворює кільцевий шар 8, який є гідравлічним затвором.

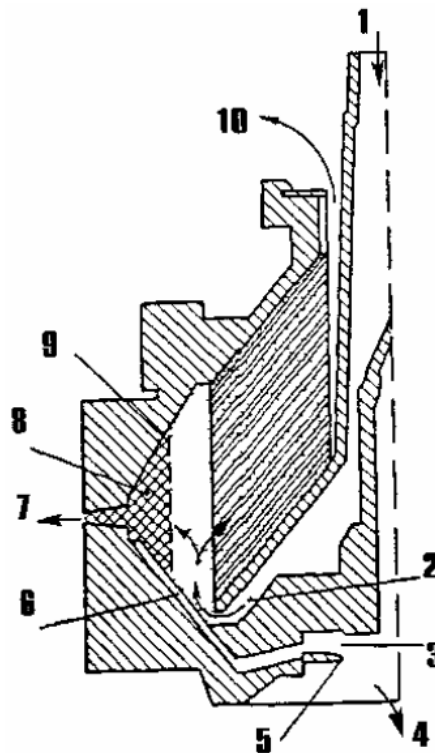


Рисунок 1.2 – Принципова схема роботи соплового барабана типу «Гравітроль»

Кількість води, що поступає повинно бути трохи більше пропускної здатності сопел 7. У цьому випадку відбувається процес саморегулювання – надлишок води 4, що подається, який не можуть пропустити сопла, переливається через край регулювального кільця 5. Такий же процес саморегулювання відбувається при коливаннях вмісту води в сепарованому

продукті. При збільшенні вмісту води в паливі збільшується її перелив, при зменшенні знижується. Очищений продукт (паливо або мастило) подається через канал 1 тарілотримача до периферії пакета тарілок проходить по міжтарілочним просторам і, вже очищений, відводиться у верхній частині барабана 10. Відокремлені суспензії по конічних стінках барабана сповзають до сопел, через які вони видаляються разом з водою, що безперервно витікає. На схемі показаний «нейтральний шар» У.

На рис. 1.3 представлена схема конструкції барабана типу «Гравітроль». На схемі показано розташування верхньої 5 і нижньої 1 регулювальних шайб. Набір регулювальних шайб складається з трьох типорозмірів: верхня – 60, 66 і 73 мм, нижня – 80,94 і 108 мм.

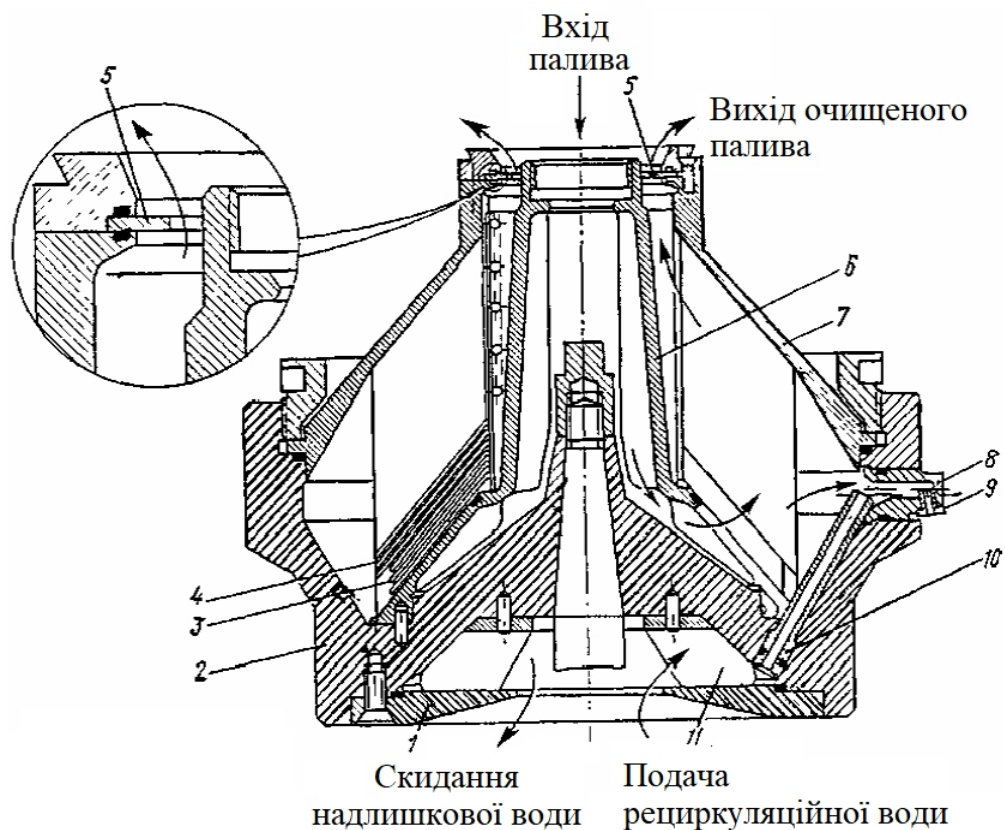


Рисунок 1.3 – Схема конструкції соплового барабана типу «Гравітроль»:

- 1 – нижня регулювальна шайба; 2 – корпус барабана; 3, 4 – малі і великі сепараційні тарілки відповідно; 5 – верхня регулювальна шайба;  
6 – тарілотримач; 7 – кришка барабана; 8 – соплотримач; 9 – сопла (8шт.);  
10 – рециркуляційні трубки (8 шт.); 11 – камера рециркуляційної води



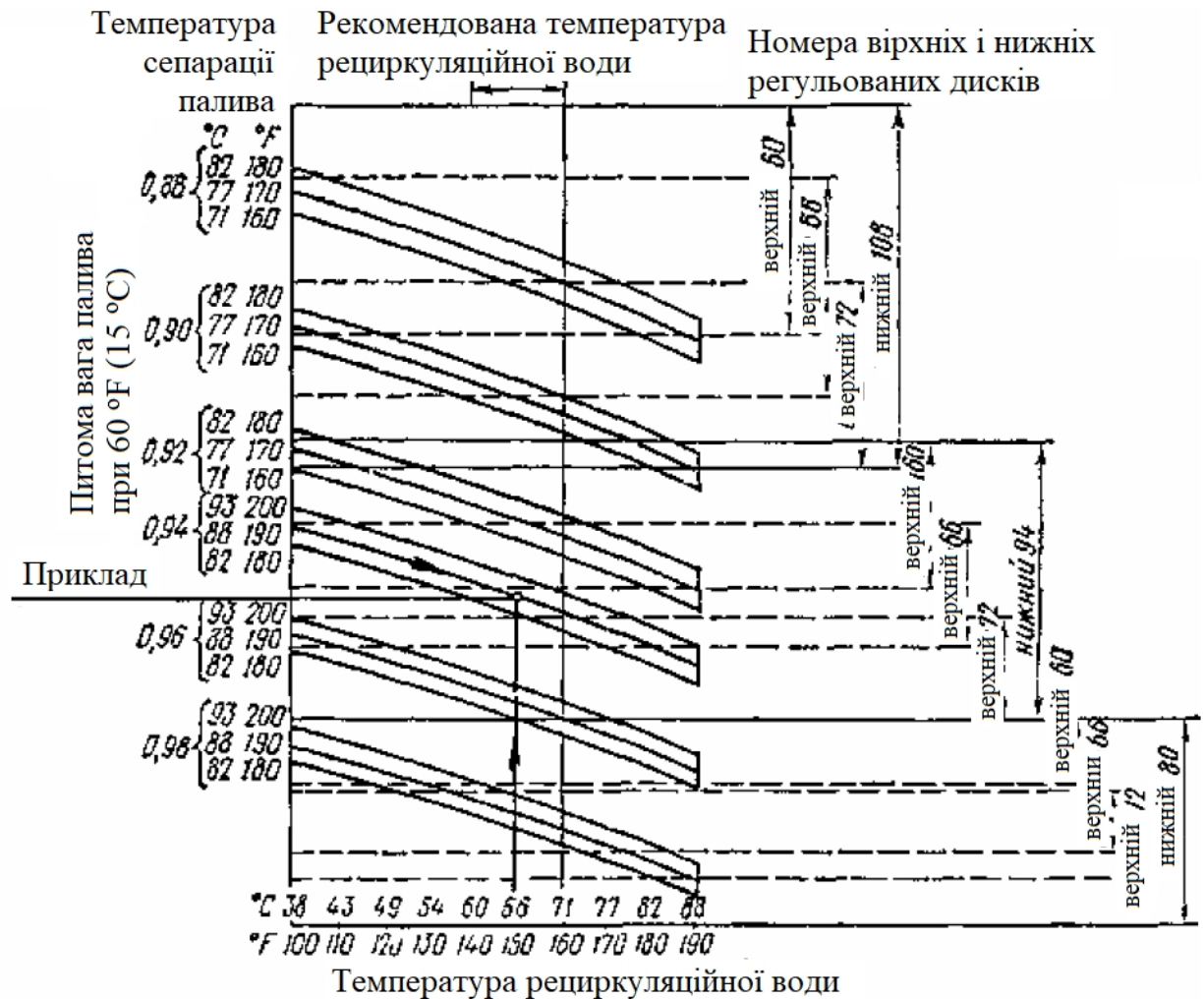


Рисунок 1.4 – Номограма для вибору регулювальних дисків сепаратора типу «Шарплес»

Шайби вибираються за номограмою на рис. 1.4 в залежності від питомої ваги палива, температури сепарації і температури рециркуляційної води. Температури слід приймати згідно з рекомендаціями фірми: для води 66-71 °C; для палива з питомою вагою (0,88-0,92 г/см³) – (71-82 °C); з питомою вагою (0,94-0,98 г/см³) – (82-93 °C). Позитивними особливостями барабана є:

1. Поверхня розділу фаз паливо (мастило)-вода ("нейтральний шар", рис. 1.2) знаходиться поза пакетом тарілок. Це підвищує ефективність роботи барабана завдяки тому, що вся поверхня тарілок працює на очистку палива (мастила).

2. Відокремлені від сепарованого продукту частки проходять на шляху до сопел шар води, в результаті чого відбувається більш повне їх очищення від зовнішніх плівок палива (мастила) і таким чином знижуються втрати сепарованого продукту.

3. У процесі роботи сепаратора відбувається описане вище саморегулювання в залежності від вмісту води в сепарованому продукті.

На рис. 1.4 показано приклад, коли питома вага 0,94 при 60 °F (15° C), температура сепарованого палива 1900 F, рециркуляційної води 1500 F, тому за номограмою обирається верхній диск 66, нижній диск 94.

На рис. 1.5 приведена принципова схема установки «Гравітроль-1000». Необроблене паливо по трубопроводу 1 подається через підігрівач 4, запобіжний клапан 5, і фільтр 6 до центрального патрубку сепаратора. У разі необхідності подається вода по трубопроводу 2 в змішувач 3, де вона перемішується з паливом.

Очищене паливо відводиться з верхньої порожнини 7 корпусу сепаратора, а шлам і вода зливаються в бак 13. Надлишок рециркуляційної води, яка переливається через регулювальну шайбу 8, також відводиться по каналу 9 в бак 13. З бака вода насосом 15 через фільтри 16, регулятор витрат 18 і запобіжний клапан 19 подається на рециркуляцію в сепаратор. У разі необхідності вода по трубопроводу 20 може бути відведена на повторне використання для промивання палива.

Для підтримки необхідної температури бак 13 забезпечений підігрівачем 12. Шлам, що осів в баку, періодично видаляється. Трубопровід 14 служить для поповнення, а клапан 11 для перепуску води. Надлишок води зливається через воронку 17, а воронка 10 є сигналом перевищення рівня води в баку 13. Особливістю сепараторів типу "Гравітроль" є без муфтовий привод від електродвигуна до барабана. Він здійснюється безпосередньо через черв'ячну пару.

Основні технічні характеристики сепаратора типу «Гравітоль-1000» фірми Шарплес (Sharples) приведені в табл. 1.1.

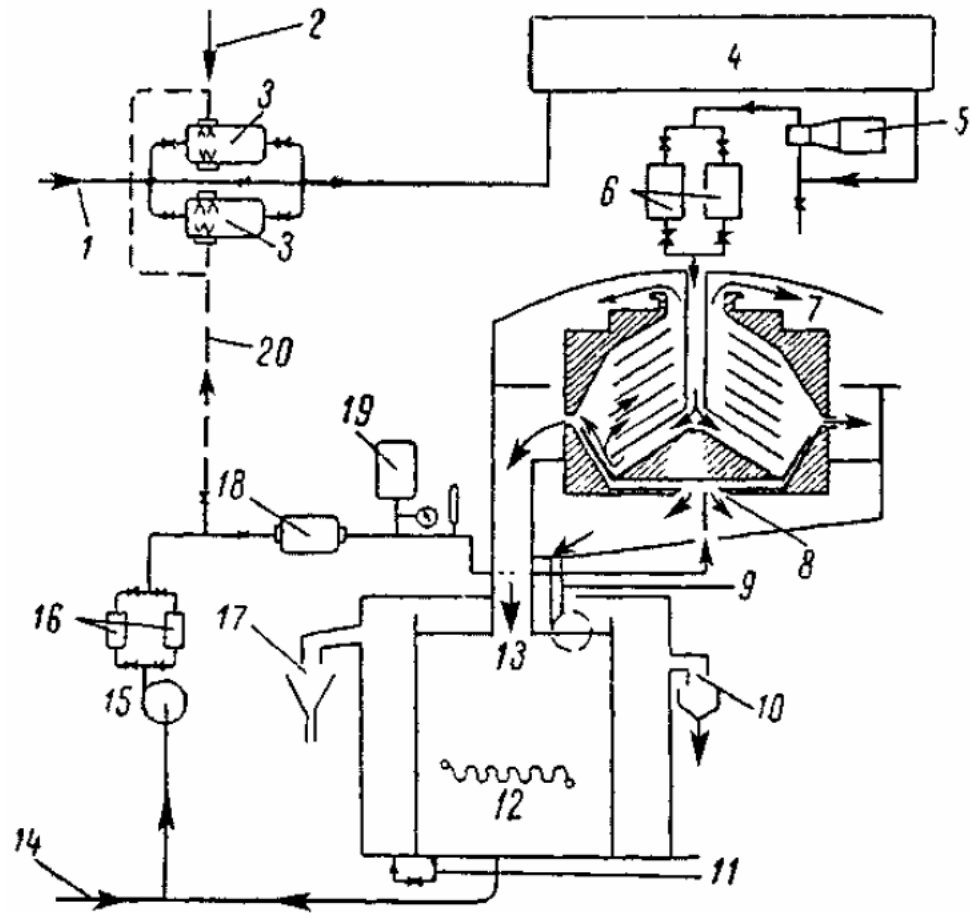


Рисунок 1.5 – Принципова схема установки сепаратора типу «Гравітоль-1000».

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики сепаратора типу «Гравітоль-1000» фірми Шарплес (Sharples)

Параметр	Значення параметра
Продуктивність, т/год	25
Потужність електродвигуна к.с. (кВт):	10
сепаратор і насоси	10 (7,355 кВт)
рециркуляційний насос	1 (0,736 кВт)
Число обертів барабана, об/хв	8000

Продовження таблиці 1.1 – Технічні характеристики сепаратора типу «Гравітоль-1000» фірми Шарплес (Sharples)

Вага барабана, кг	50
Діаметр барабана (внутрішній), мм	250
Габарити установки, мм:	
– довжина	1092
– ширина	940
Вага установки, кг	1250

На рис. 1.6 показано кінематичну схему, яка є загальною для більшої кількості тарілчастих сепараторів.

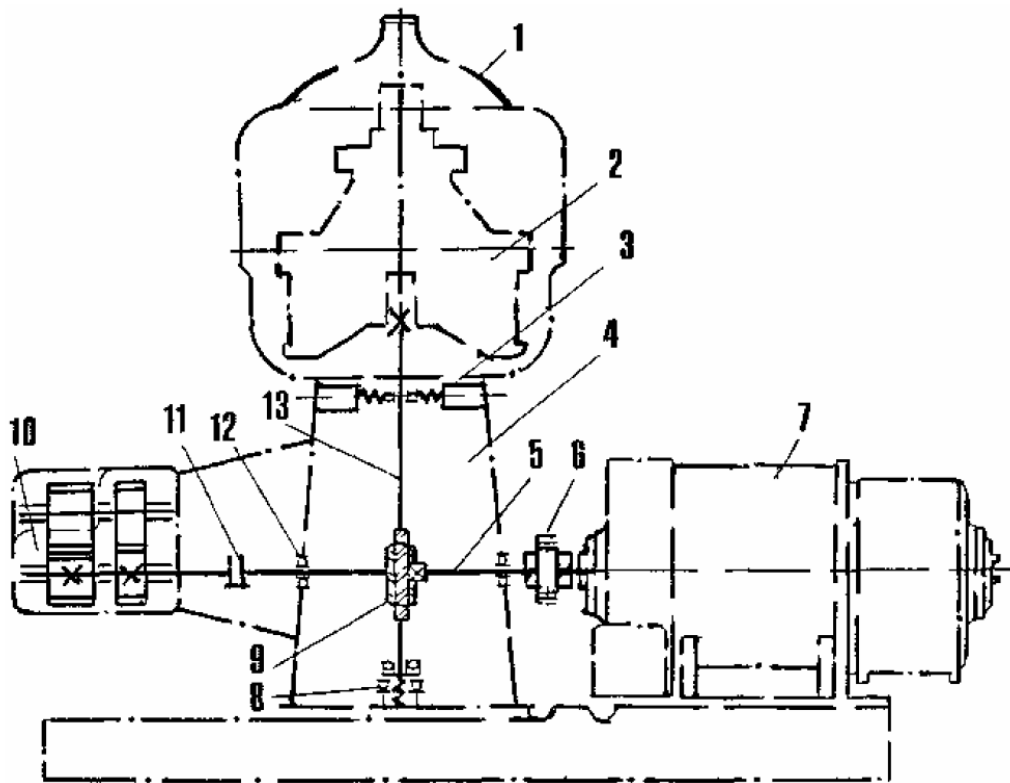


Рисунок 1.6 – Загальна схема кінематики суднового сепаратора: 1 – збірник;  
 2 – барабан; 3 – верхня опора; 4 – станина; 5 – горизонтальний вал;  
 6 – фрикційна муфта; 7 – електродвигун; 8 – нижня опора; 9 – черв'ячно-  
 гвинтова пара; 10 – шестеренні насоси; 11 – еластична муфта;  
 12 – підшипник; 13 – вертикальний вал

Корпус сепаратора та електричний двигун знаходяться на загальному фундаменті. Від електричного двигуна 7 через фрикційну муфту 6 обертання передається горизонтальному валу 5, який закріплений в двох підшипниках 12 в станині 4 сепаратора.

На горизонтальному валу знаходиться черв'ячна шестерня, яка входить в зачеплення з черв'яком вертикального валу, утворюючи черв'ячно-кручену пару 9, за допомогою якої здійснюється передача обертання вертикальному валу 13. Він розташований в двох опорах – верхній 3 і нижній 8. Верхня опора має радіальний шарикопідшипник і шість пружинних амортизаторів, а в нижній опорі розміщені радіально-упорні підшипники.

На верхню конусну частину вертикального валу насаджений барабан 2, закритий збіркою 1, який служить для підведення і відведення сепарованої рідини. Він має оглядові віконця для спостереження за процесом сепарування.

Від горизонтального валу 5 через еластичну муфту 11 обертання передається на шестеренні насоси 10. Вони служать для подачі рідини на сепарування і її відведення.

### **1.3 Особливості апаратури керування і захисту суднових електроприводів**

Апаратура керування і захисту є складовою частиною електропривода. Для переважної більшості суднових асинхронних приводів, в тому числі і автоматизованих, найбільш поширеним на сьогодні є релейний принцип керування, що пов'язаний з пуском, зупинкою, реверсуванню і ступінчастим регулюванням частоти обертання. У випадку слабкої інтенсивності керуючих процесів в багатьох випадках економічно виправданим є використання контактної апаратури. Залежно від призначення і характеру роботи привода

комплектні системи керування представляються у вигляді контролерів, магнітних пускачів, магнітних контролерів. Станції керування мають ступінь захищеності, що відповідає місцю установки на судні: на відкритих палубах IP56; в приміщеннях, в тому числі в машинних відділеннях, IP 44.

Розглянемо апаратуру керування електроприводами. Експлуатаційні якості апаратури керування визначаються її вихідними характеристиками, реалізованими відповідно до загального призначенням електропривода.

Комутаційна здатність характеризує можливість використання апарату при вмиканні або розмиканні електрокіл з певними параметрами електричних навантажень. Комутація електрокіл двигунів змінного струму відбувається в широкому діапазоні зміни струмів і напруги. Наприклад, під час пуску короткозамкнутого асинхронного електродвигуна кидок струму першої напівхвилі може перевищити в 1,4-1,6 рази розрахункове значення пускового струму, що викликає значні динамічні зусилля в контактній системі керуючих апаратів. Одночасно вібрація контактів через їх зіткнення визначає циклічність виникнення і гасіння дуги в умовах великого струму, що істотно погіршує комутаційний процес вмикання.

У зв'язку з викладеним розрізняють два види комутаційної здатності апаратів: нормальну і граничну, які задаються у відносних одиницях номінального струму. Все різноманіття навантажень для електрокіл змінного струму умовно розбите на чотири типові групи А1-А4. Для найбільш важкої четвертої групи А4 електричний апарат при  $\cos \varphi = 0,35$  повинен забезпечувати нормальну комутацію пуску двигуна при шестикратному струмі, граничну комутацію – при десятикратному струмі. Апарати змінного струму найчастіше мають мостикові контакти і систему дугогасіння у вигляді простих деіонних решіток. На постійному струмі контактні елементи мають спеціальні електромагнітні системи дугогасіння.

Механічна зносостійкість – здатність апарату виконувати певну кількість циклів «вмикання-вимикання» (ВВ) без струму, залишаючись після цього в справному технічному стані. Рівень механічної зносостійкості зв'язується з допустимою частотою вмикання-вимикання за одну годину при нормальних умовах експлуатації, або із загальним ресурсом по числу циклів вмикання-вимикання.

Електрична зносостійкість – здатність апарату виконувати певну кількість комутаційних циклів вмикання-вимикання при комутації його контактами електрокіл з заданими параметрами, залишаючись після цього в справному технічному стані. При розмиканні знос залежить від напруженості поля дугогасіння, швидкості руху і розчину контактів. У електроколах змінного струму знос контактів вмикання-вимикання зростає пропорційно квадрату робочої напруги. При вмиканні знос зв'язується зі швидкістю наростання струму, його максимальним значенням, тривалістю вібраційного періоду зіткнення. Тут найбільш важливим параметром є натискання контактів, яке строго регламентується заводами-виробниками в залежності від матеріалів, роду струму і виду комутаційного електрокола.

Електрична зносостійкість визначається допустимим числом циклів вмикання-вимикання. Для апаратів зі змінними контактами вона визначається ресурсом контактів до їх заміни. Зазвичай електрична зносостійкість по числу циклів вмикання-вимикання становить 8-15 % механічної.

За рівнем механічної та електричної зносостійкості всі електричні апарати діляться на класи: 0-IV. Апарати IV класу, що мають найбільші можливості, допускають до 1200 вкл/год при механічному ресурсі до 10<sup>7</sup> циклів вмикання-вимикання.

Термічна стійкість – здатність, не перегріваючись, протистояти граничним струмам, які проходять через апарат. В електроприводах термічна стійкість характеризує безвідмовну роботу контактів протягом 1 с при струмі

10  $I_n$ . Термічна стійкість контактних груп сучасних контакторів, наприклад, становить (16-20)  $I_n$ .

Динамічна стійкість – здатність апарату витримати без пошкоджень ударний струм, що близький до короткого замикання. В електроприводах динамічна стійкість перевіряється струмом 18-22  $I_n$  тривалістю 0,1 с. Для контакторів динамічна стійкість становить (20-30)  $I_n$ ; менші значення відноситься до апаратів більшої потужності.

Час спрацювання. Власний час спрацювання контакторів постійного струму залежить від їх габаритних розмірів і знаходиться в межах 0,05-0,3 с, а контакторів змінного струму – в межах 0,03-0,07 с. У контакторах, керованих постійним струмом, є різко виражена залежність власного часу спрацювання від прикладеного до втягувальної котушки напруги.

Електромагнітні реле часу постійного струму мають можливість регулювання часу відпускання в залежності від типу апарату в межах 0,25-5 с. У суднових схемах керування досить широко використовуються контактори і реле з механічним регулюванням затримки часу спрацювання, що характеризується відомою робочою нестабільністю. Найбільш представлені повітряні демпфувальні пристрої з регулюванням часу в межах 0,3-8,0 с. Для програмних пристроїв, що вимагають більш широкого діапазону контролю тривалості операцій, використовуються моторні реле часу.

Апаратура захисту електроприводів. Розрахунковий термін служби асинхронних двигунів визначиться в основному ресурсом обмоток статора. Наприклад, для морської модифікації загальної серії двигунів 4А термін служби становить не менше 20 років при напрацюванні до 40 тис. год, а ресурс обмотки статора – до капітального ремонту 20 тис. год.

Вирішальним фактором, що обумовлює зниження якості ізоляції, є підвищена температура. Тому всі види захистів електроприводів мають спільне завдання виключити можливий перегрів двигуна при будь-якому



порушенні нормативного режиму роботи. Для всіх приводів обов'язковими є захист від перевантаження та нульове блокування (захист). Є випадки додаткового використання захисту від неповнофазного живлення. Елементи і блоки захисту становлять комплектну частину магнітних пускачів і станцій керування.

Захист від перевантажень. Виконується різними технічними засобами. Дуже часто принцип дії захисту визначає його найменування. Захист судових асинхронних двигунів може бути розділений на три основні групи: теплова струмовий, температурний, струмовий.

Тепловий струмовий захист набув найбільшого поширення. Він реалізується за допомогою теплових реле з термобіметалічними елементами. Такі реле включаються в дві або три фази двигуна. У вітчизняних електроприводах з асинхронними двигунами найчастіше використовуються реле серії ТРТ. Оцінка температури двигуна проводиться опосередковано за інтегральним значенням струму, що протікає через термоелемент. Ефективність роботи теплового струмового захисту залежить від ступеня відповідності теплових властивостей реле і об'єкту захисту. Захисні характеристики реле задаються у вигляді ампер-секундних кривих (рис. 1.7), що показують час спрацьовування в залежності від кратності струму перевантаження. Задовільна дію захисту буде в разі, коли допустимий час перевантаження двигуна і час спрацьовування реле при тому ж струмі співпадають.

Найбільш реально така відповідність може бути досягнута для електроприводів в умовах тривалого режиму роботи. При короткочасному і повторно-короткочасному режимах, що супроводжуються частими пусками, відмінність в температурних характеристиках реле і двигуна значно погіршує ефективність дії захисту. Охолодження реле і двигуна відбувається з різною інтенсивністю. Тому теплове реле практично не враховує стан двигуна по попередньому навантаженню. В результаті нагрівання теплового елемента

реле і двигуна при черговому вмиканні відбувається при різній початковій температурі. Ця обставина зумовлює відмінності в характері нагріву двигуна і термоелемента, що погіршує якість роботи захисту в розглянутому режимі. Слід також відмітити, що в зоні перевантажень ( $1,05-1,15$ )  $I_n$  робота теплових струмових реле не є стабільною.

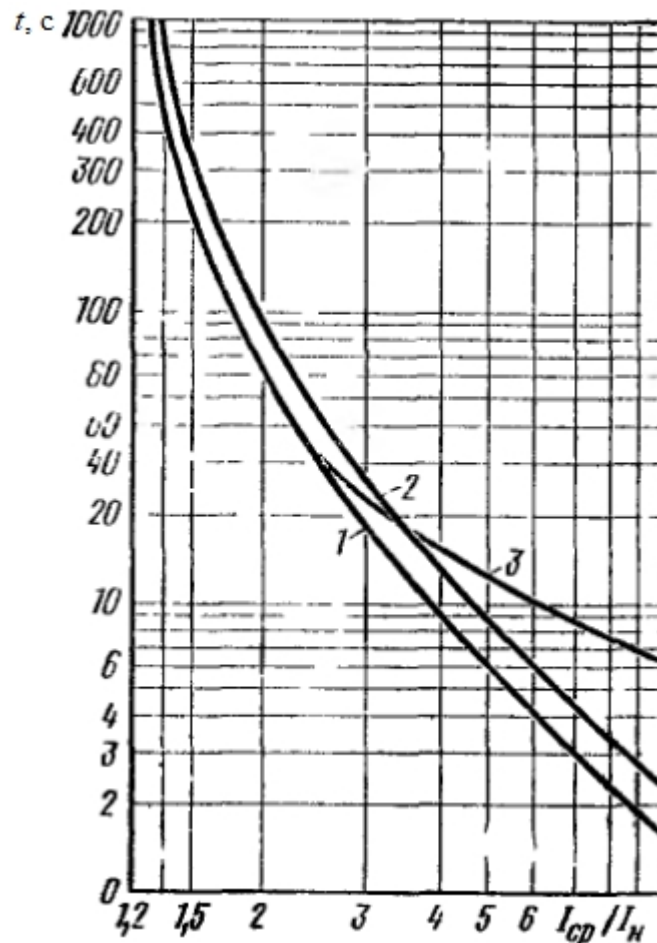


Рисунок 1.7 – Ампер-секундні характеристики теплових реле ТРТ.

Номінальні струми: 1 – до 10 А; 2 – від 10 до 140 А; 3 – вище 140 А

Температурний захист здійснюється на основі безпосереднього контролю температури обмоток двигуна. Захист дозволяє найбільш повно реалізувати теплові можливості електродвигуна у всіх режимах, при будь-яких навантаженнях. Виконання захисту уніфіковано для асинхронних машин будь-якої потужності.

Найбільш простими елементами температурного захисту є біметалічні термореле, що безпосередньо вбудовуються в лобові частини статорних обмоток. Такий вид захисту поширений в палубних електроприводах зарубіжного виробництва. Чутливий елемент термореле має вигнуту біметалеву пластину або диск, які при досягненні певної температури стрибком змінюють свій стан. Відбувається розмикання контакту, пов'язаного з біметалевим елементом. При охолодженні чутливий елемент також стрибком повертається в початковий стан. Самоповертання реле відбувається при зниженні температури на 2-3 °С. Недоліками реле є деяка інерційність, значний час саповертання. При поступовому старінні біметалу відбувається відведення уставки спрацьовування, залипання контактів.

Терморезистори з негативним температурним коефіцієнтом застосовуються в якості чутливих елементів температурного захисту в приводах, побудованих в деяких зарубіжних країнах. Термодатчики монтуються в лобових частині обмоток двигунів, мають постійну часу нагріву  $30 \pm 10$  с. Вимірювальний пристрій представляє собою граничну схему на транзисторах з релейним виходом.

На рис. 1.8 представлена одна з модифікацій схеми блоку вимірювання. Спускова схема представляє собою тригер Шмітта на двох транзисторах VT1 і VT2. Вихідним елементом є реле К, яке включене в електроколо колектору VT2. Діод VD4 виконує роль розрядного резистора. Керування тригером здійснюється за допомогою терморезистора RK, що є одним з плечей подвійного подільника напруги, складеного з резисторів R1-R2 і RK-R3. У початковому стані транзистор VT1 закритий, а транзистор VT2 – відкритий.

При підвищенні температури двигуна опір RK зменшується. Досягнувши порогу спрацьовування, тригер перекидається: VT1-відкривається, VT2 – закривається. Реле К знеструмлюється, вимикаючи через допоміжні реле головні контактори двигуна. Напівпровідникові терморезистори мають розкид параметрів. Тому, використовуючи дану схему

як уніфіковану, передбачається можливість регулювання уставки спрацьовування за допомогою резистора R3. Діод VD3 грає роль температурного компенсатора транзистора VT1, забезпечуючи стабільність порога спрацьовування. Резистор R9 змінює взаємний вплив емітерного зворотного зв'язку в транзисторах VT1 і VT2, що дозволяє регулювати коефіцієнт повернення тригера.

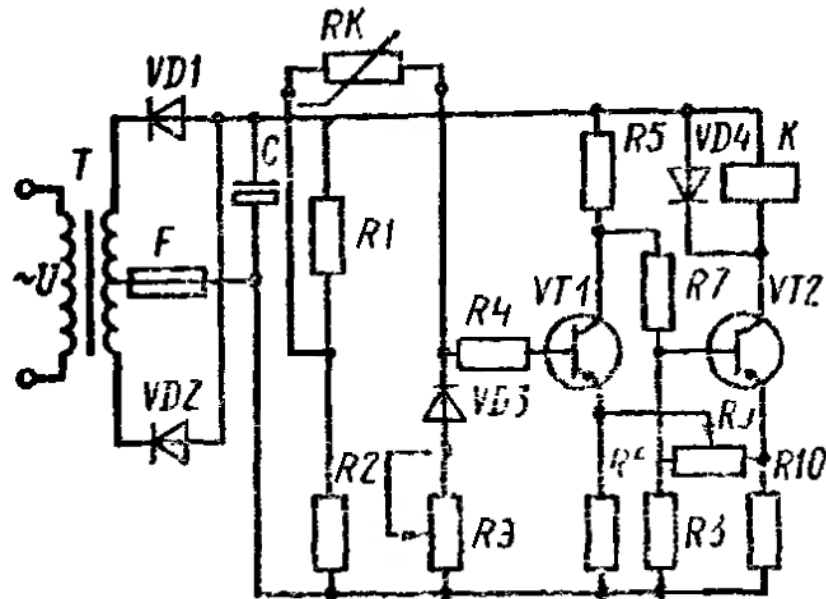


Рисунок 1.8 – Схема модуля температурного захисту з термісторами

Живлення схеми здійснюється через вбудований трансформатор Т. Діоди VD1 і VD2 складають двухполуперіодну схему випрямлення, пульсуючий струм якої згладжується конденсатором С.

Терморезистори з позитивним температурним коефіцієнтом – позистори. Апаратура з використанням позисторів вважається більш досконалою. Справність кола позисторів автоматично контролюється, оскільки її обрив еквівалентний спрацьовуванню захисту. Позистори мають властивість різкого збільшення опору в вузькому інтервалі температур, відповідно уставці спрацьовування. Позистори володіють стабільністю своїх теплових характеристик. Ця обставина істотно спрощує вимірювальну схему і дозволяє уніфікувати її для використання в приводах будь-якої потужності.

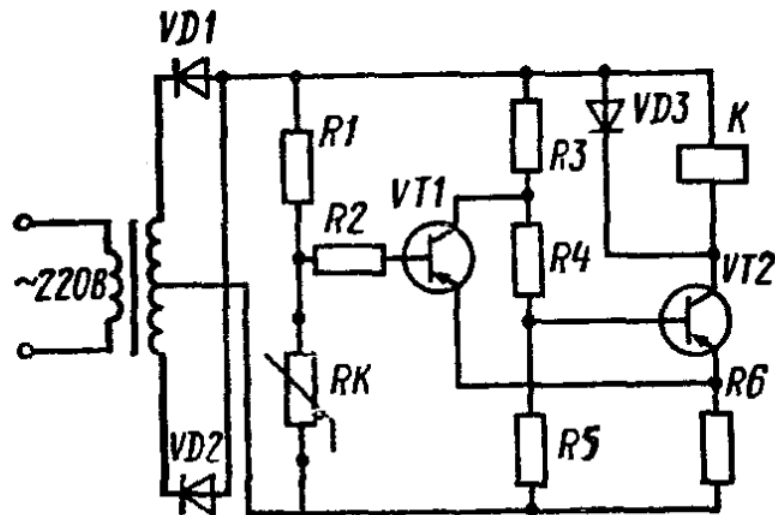


Рисунок 1.9 – Принципова схема температурного захисту типу S-MVA на позисторах

На рис. 1.9 представлена схема температурного захисту типу S-MVA позисторах, розроблена для використання в судновому електроприводі. Постійна часу спрацьовування становить 0,025 с. Схема виконана у вигляді несиметричного тригера на транзисторах VT1, VT2 з виходом на реле К. В початковому стані VT1 відкритий, VT2 – закритий. Позистор RK є одним з плечей дільника напруги R1-RK. При підвищенні температури до порогу спрацьовування відбувається перекидання тригера. Транзистор VT1 закривається, VT2 – відкривається. Реле К здійснює свої захисні функції. Перевагою схеми є її простота, універсальність, відсутність необхідності в додаткових регулюваннях, системах компенсації і налаштування. Уставка спрацьовування залежить від типу позистора, який підбирається відповідно до класу ізоляції двигуна. Більш ніж десятикратна зміна початкового опору позистора в інтервалі температури уставки дозволяє послідовно з'єднувати до трьох термодатчиків, контролюючи нагрів електродвигуна одночасно в декількох точках.

Струмівий захист здійснюється за допомогою струмових електромагнітних реле. Уставка спрацьовування реле лежить в межах (1,15-

1,25)  $I_n$ . Захист спрацьовує із затримкою часу, не реагуючи на випадкові короточасні кидки струму. Реле часу схемної автоматики контролюють також готовність захисту, виключаючи його дію в пусковий період.

Нульова блокування. Відключає привод при короточасному зникненні напруги, в тому числі і при спрацьовуванні захисту від перевантаження. Визначає можливість введення в дію електропривода тільки з нульового положення поста керування.

## РОЗДІЛ 2

### ВИКЛАД ЗАГАЛЬНИХ ПІДХОДІВ І ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Структурно-логічна схеми дослідження, багатoshвидкісні асинхронні двигуни в судновому електроприводі

Структурно-логічна схема дослідження з розробки системи керування електропривода суднового сепаратора показана на рис. 2.1.

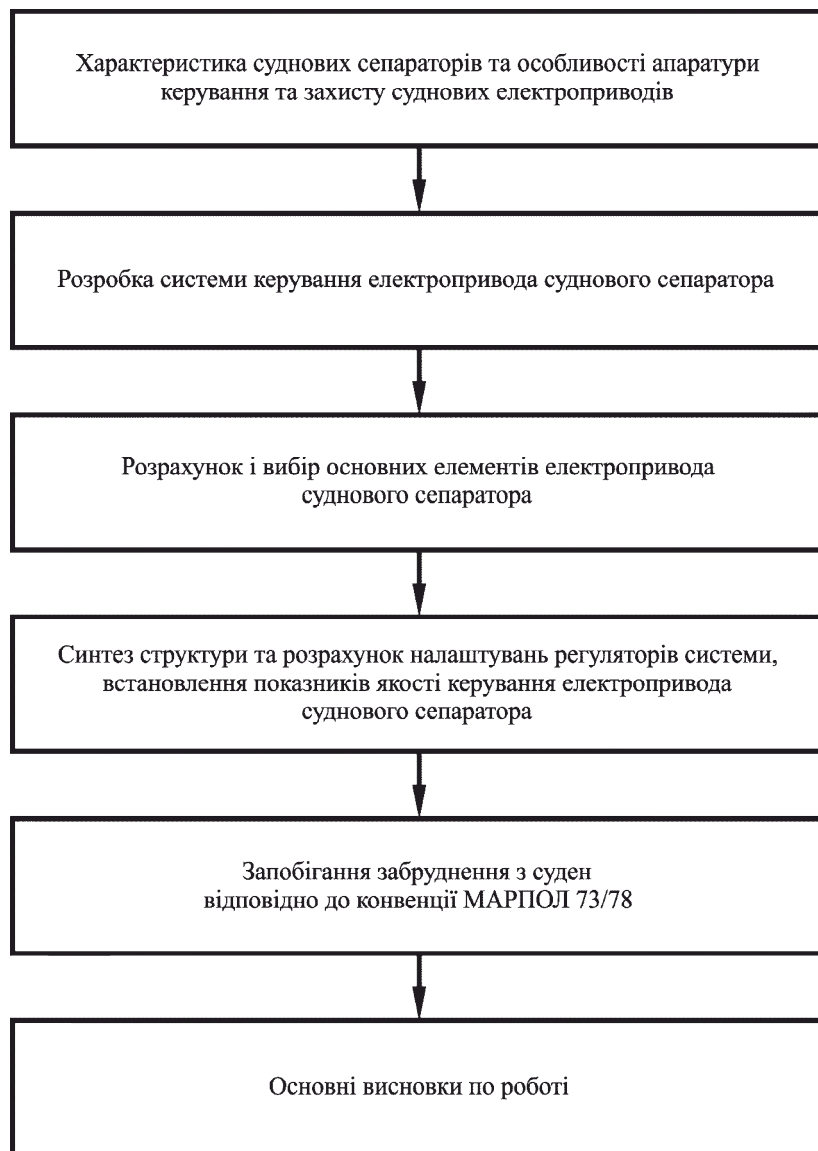


Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема дослідження з розробки системи керування електропривода суднового сепаратора

Широке поширення суднові електроприводи з багатошвидкісними асинхронними електродвигунами отримали в кінці 1950-х і початку 1960-х років. Всі багатошвидкісні асинхронні трифазні електродвигуни, що експлуатуються на судах, можна об'єднати в дві групи:

а) електродвигуни тривалого режиму навантаження модифікації єдиного ряду;

б) електродвигуни короткочасного і повторно-короткочасного режиму навантаження з підвищеним пусковим моментом.

Електроприводи з двигунами першої групи призначаються для регульованих суднових механізмів тривалого режиму навантаження з легкими умовами пуску. До таких механізмів відносяться вентилятори, компресори, відцентрові і гвинтові насоси, сепаратори та ін.

Оскільки до регульованих електроприводів тривалого режиму навантаження не пред'являється жорстких вимог до динаміки пуску і гальмування, то вибір електродвигунів визначається найкращими енергетичними показниками. Таким вимогам відповідають двигуни загального призначення. По суті ці електродвигуни є багатошвидкісною модифікацією єдиної серії асинхронних двигунів загальнопромислового виконання серії 4А.

У 1976 р в серії електродвигунів 4А були створені ряди з різним співвідношенням числа полюсів, що охоплюють діапазон потужностей від 0,1 до 200 кВт.

Часто багатошвидкісні двигуни використовуються для привода відцентрових нагнітачів, у яких в процесі роботи необхідно збільшувати подачу в 1,5-2 рази. Для таких приводів використовуються двошвидкісні двигуни з двома окремими обмотками з співвідношенням синхронних швидкостей 1:1,25 або 1:1,5.

Двошвидкісні і чотиришвидкісні електродвигуни зі співвідношенням синхронних швидкостей 1:2 мають відповідно одну або дві



полюсоперемикальні обмотки. Тришвидкісні електродвигуни мають дві обмотки, одна з яких полюсоперемикальна.

Електроприводи з двигунами другої групи призначаються для регульованих суднових механізмів з важкими умовами пуску, гальмування, необхідністю регулювання швидкості в процесі роботи і великою частотою включень. До таких механізмів відносяться якірно-швартовні і вантажопідйомні, які, як правило, мають короткочасний або повторно-короткочасний режим навантаження.

Спеціальна серія багатошвидкісних асинхронних електродвигунів (серія МАП) була створена в 1950-1952 рр. З 1963 р. почалося виробництво електродвигунів МАП з кремнійорганічною ізоляцією класу Н, а в 1976 році була створена нова серія з урахуванням досвіду експлуатації суднових палубних механізмів і почалося серійне виготовлення деталей цієї серії.

В останні роки проведена модернізація електродвигунів серії МАП та освоєно виробництво двигунів нових модифікацій, які отримують живлення від перетворювачів частоти і можуть використовуватися в складі тиристорних електроприводів.

У вибухонебезпечних приміщеннях використовується модифікація вибухозахищених електродвигунів серії ВМАП, які за своїми характеристиками аналогічні серії МАП.

Основна серія електродвигунів МАП охоплює дев'ять типорозмірів (габаритів), побудованих на шести діаметрах, і охоплює діапазон потужностей від 1 до 120 кВт.

Все багатошвидкісні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Більшість роторів має литу обмотку з алюмінієвого корозійностійкого сплаву з підвищеним опором. У двигунів деяких виконань обмотка ротора виготовляється з мідних стрижнів з привареними латунними короткозамкненими кільцями.

Всі електродвигуни серії МАП повторно-короткочасного режиму навантаження побудовані за принципом регулювання при постійному моменті.

Оскільки електродвигуни серії МАП призначені для механізмів, що вимагають ефективного гальмування, то для кожного типорозміру передбачається виконання з прибудованим швидкодіючим дисковим гальмом з електромагнітним приводом. Загальний вигляд електродвигуна серії МАП з прибудованим дисковим гальмом показаний на рис. 2.2.

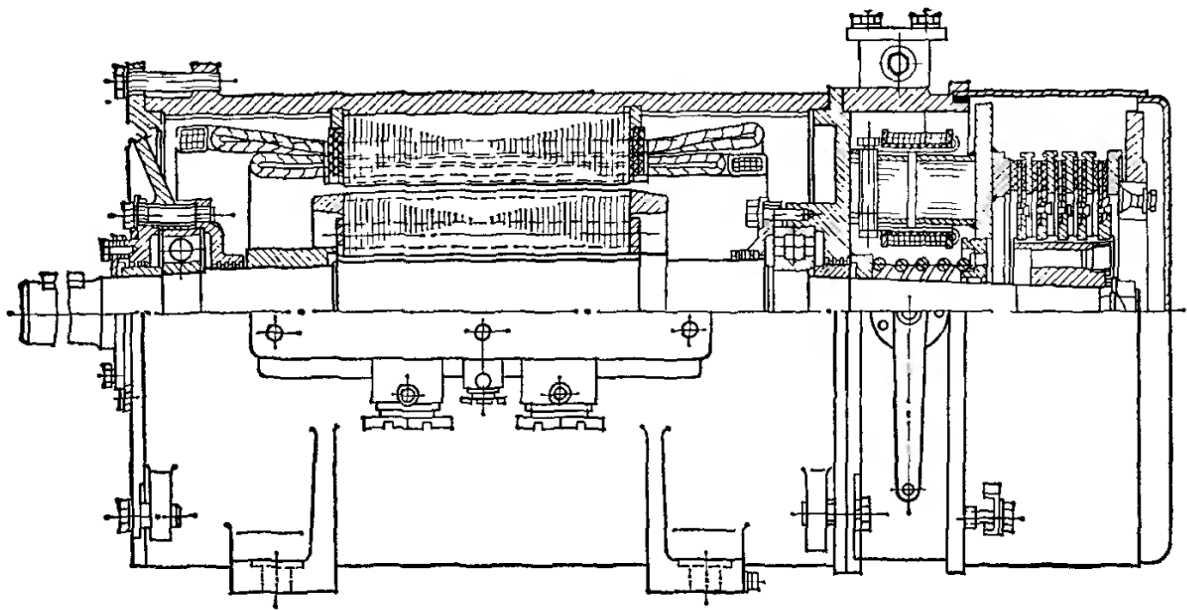


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд електродвигуна серії МАП  
з дисковим гальмом

Промисловість виготовляє дві серії дискових гальм, прибудованих до двигунів. Гальма з приводом постійного струму ТДП і змінного струму ТМТ. Гальмування здійснюється тертям обертливих дисків з фрикційним матеріалом об нерухомі сталеві диски.

Електромагніти гальм змінного струму мають магнітну систему, що складається з кільцевого нерухомого осердя, привареного до корпусу двигуна, і якоря кільцевого типу, який розташовується на тих же штирях, що і нерухомі гальмівні диски, і може переміщатися в аксіальному напрямку.

Між осердям і якорем розташовуються шість котушок електромагніту, що рівномірно розміщені по окружності. Між корпусом двигуна і якорем встановлена головна гальмівна пружина, зусилля якої через якір передається до нерухомих дисків і потім через поверхні тертя – до рухомих дисків. Котушки гальм при напрузі мережі 220 В з'єднуються в трикутник, а при напрузі 380 В – в зірку.

Електромагнітна система гальм постійного струму більш проста. Конструкція гальма постійного струму типу ТДП показана на рис. 2.3.

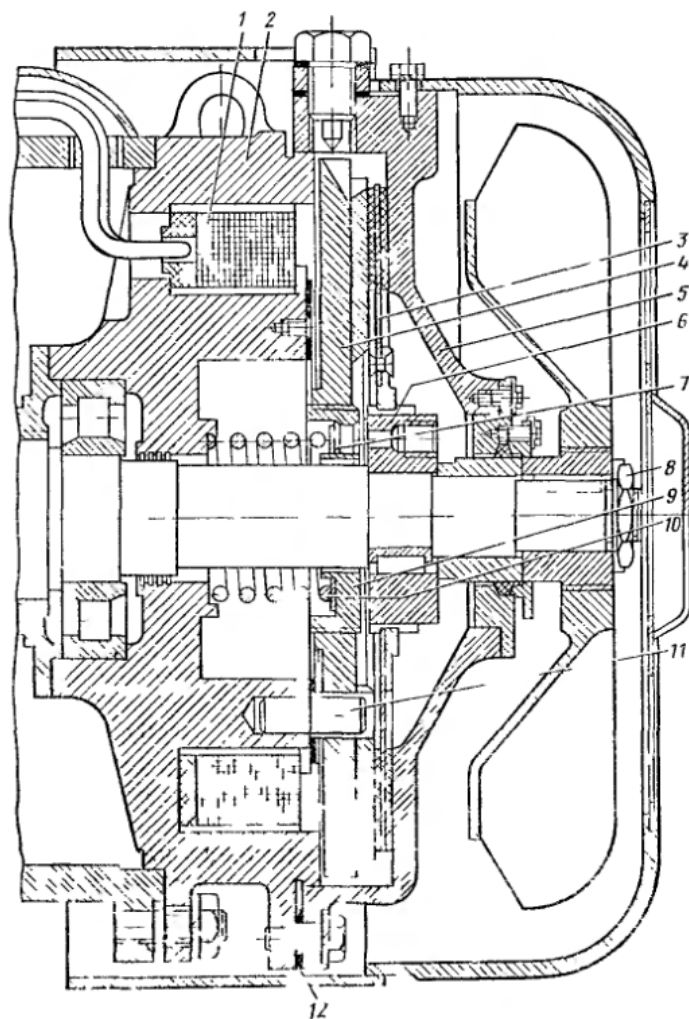


Рисунок 2.3 – Гальмо постійного струму типу ТДП

Осердя магнітопровода утворене фасонним відливом в підшипниковому щиті 2, де розташовується кільцева котушок електромагніту 1. Якір електромагніту 4 може переміщатися в аксіальному напрямку по

магнітним штифтам 11. При відключеному електромагнітному якір і гальмівний диск 3, що обертається, притискаються гальмівною пружиною 10 до кришки гальма 5. Ротор двигуна загальмований. При ввімкненні електромагніту якір 4 притягається до осердя, гальмівна пружина стискається і звільняється гальмівний диск, який може вільно переміщатися по шліцьовій втулці 6.

Регулювання гальмівного зусилля здійснюється шляхом зміни сили стиснення пружини 10 за допомогою регулювальної муфти 9 і шайби 7, а величина ходу якоря регулюється товщиною шайб 12.

На кінці валу розташовується вентиляторна крилатка для зовнішнього обдування корпусу двигуна. Крилатка кріпиться на валу двигуна гайкою 8. Конструкція гальма має пристрій для ручного розгальмовування, для чого в корпусі гальма є два отвори, в які вгвинчуються пробки-болти.

В даний час на суднах є велика кількість багатошвидкісних асинхронних двигунів, побудованих на наше замовлення на зарубіжних фірмах. Переважна більшість багатошвидкісних асинхронних двигунів виконано з незалежними статорними обмотками за принципом сталості моменту.

Двигуни виготовляються як в однороторному, так і в двороторному виконанні. При однороторному виконанні в пази статора укладаються всі обмотки, причому чим більше число полюсів має обмотка, тим ближче вона розташовується до повітряного зазору. При двороторному виконанні є також два пакети статорного заліза. Найчастіше двороторними виготовляються тришвидкісні асинхронні двигуни. В цьому випадку швидкохідний ротор і статор з двома електрично не пов'язаними обмотками розташовуються з боку механізму. Обмотка статора, що має менше число полюсів, укладається на дно паза, а більше – ближче до повітряного зазору. Тихохідний ротор і відповідний йому пакет статорного заліза з багатополусною обмоткою розташовуються з боку, протилежного механізму.

Переважає більшість двигунів мають прибудований однодискове електромагнітне гальмо, яке працює на змінному або на постійному струмі. Одна з конструкцій дискового гальма змінного струму фірми «Сіменс» для асинхронного двигуна типу 1PB 2788 показана на рис. 2.4.

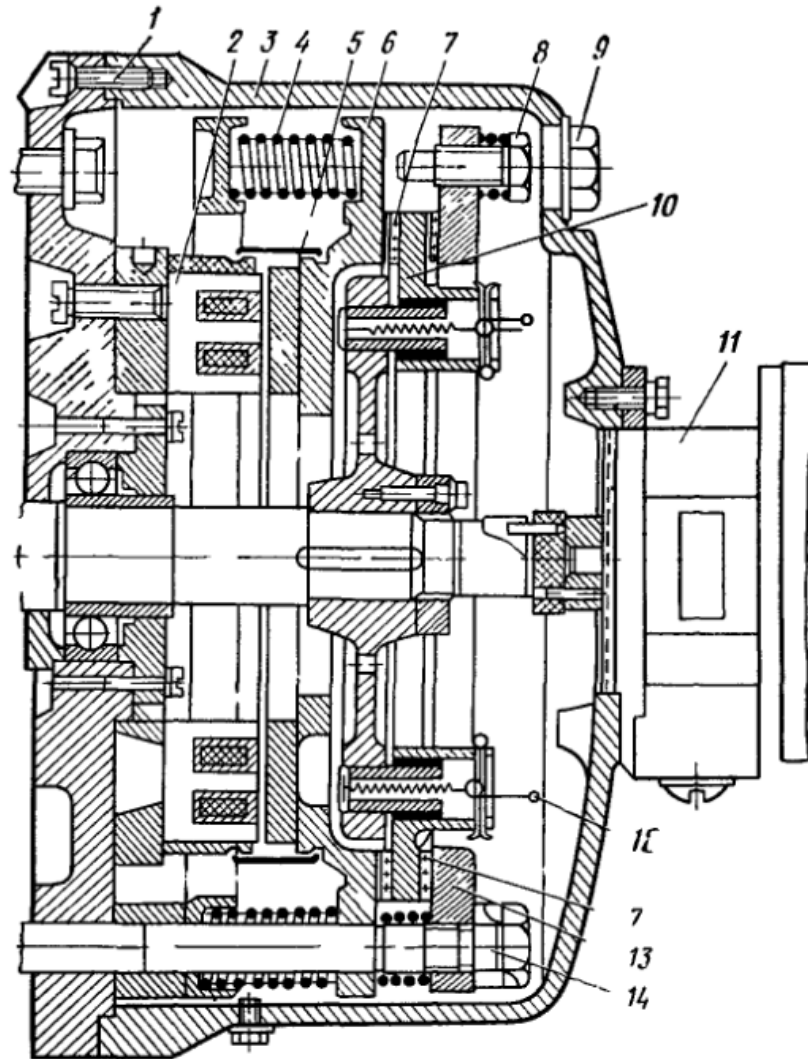


Рисунок 2.4 – Дискове гальмо змінного струму

Багатошвидкісні асинхронні двигуни, як правило, мають незалежну систему вентиляції (від окремого електроventильатору).

На рис. 2.4 використано наступні позначення:

- 1 – кріпильний болт;
- 2 – гальмівний магніт ТМ;
- 3 – ковпак гальма;
- 4 – гальмівні пружини, що затискають диск;
- 5 – гумова ущільнююча манжета;
- 6 – нерухомий диск, пов'язаний з якорем гальмівного магніту;
- 7 – гальмівні прокладки Ферродо;
- 8 – розгальмований болт;
- 9 – гайкова заглушка;
- 10 – обертальний гальмівний диск, пов'язаний з валом ВД;
- 11 – реле гальмування;
- 12 – натяжні пружини;
- 13 – гальмівне кільце;
- 14 – гайки регулювання.

## **2.2 Розробка системи скалярного керування електроприводом суднового сепаратора «Гравітоль-1000»**

Варіант функціональної схеми системи частотного керування асинхронним двигуном із зворотним зв'язком за струмом статора, представлений на рис. 2.5. Тут сигнали  $i_{sa}$  і  $i_{sc}$ , що пропорційні миттєвим значенням струмів фаз А і С обмоток статора, з виходу датчиків струму ДС<sub>а</sub> і ДС<sub>с</sub> поступають у функціональний перетворювач струму ФПС, де формуються вихідні сигнали  $I_1$  і  $I_{1c}$ , що пропорційні відповідно значенню струму статора і активній складовій цього струму. В вузлах  $\Sigma_1$  і  $\Sigma_2$  сумуються сигнали керування і зворотних зв'язків, що поступають з функціональних пристроїв А1, А2 і А3. Пристрій А4 забезпечує проходження

сигналу  $I_1$  на вхід АЗ лише при його перевищенні на суматорі  $\Sigma_3$  сигналу  $I_{1\max}$ , що пропорційний діючому значенню максимально допустимого струму статора АД.

Призначення кожного з контурів зворотних зв'язків і їх вплив на властивість електроприводу доцільно розглянути окремо. Так, при дії лише позитивного зворотного зв'язку по струму з боку А1 по мірі збільшення моменту статичного навантаження АД і відповідного збільшення струму статора на вхід суматора  $\Sigma_2$  поступає додатковий сигнал  $u_i$ , що збільшує сигнал  $u_u$ . В результаті по мірі збільшення струму статора збільшується і вихідна напруга ПЧ. При цьому його вихідна частота, що визначається сигналом  $u_f$ , залишається постійною. Підвищення напруги на обмотках статора АД сприяє компенсації падіння напруги на повному їх опорі і, в результаті, збільшенню потоку намагнічування АД.

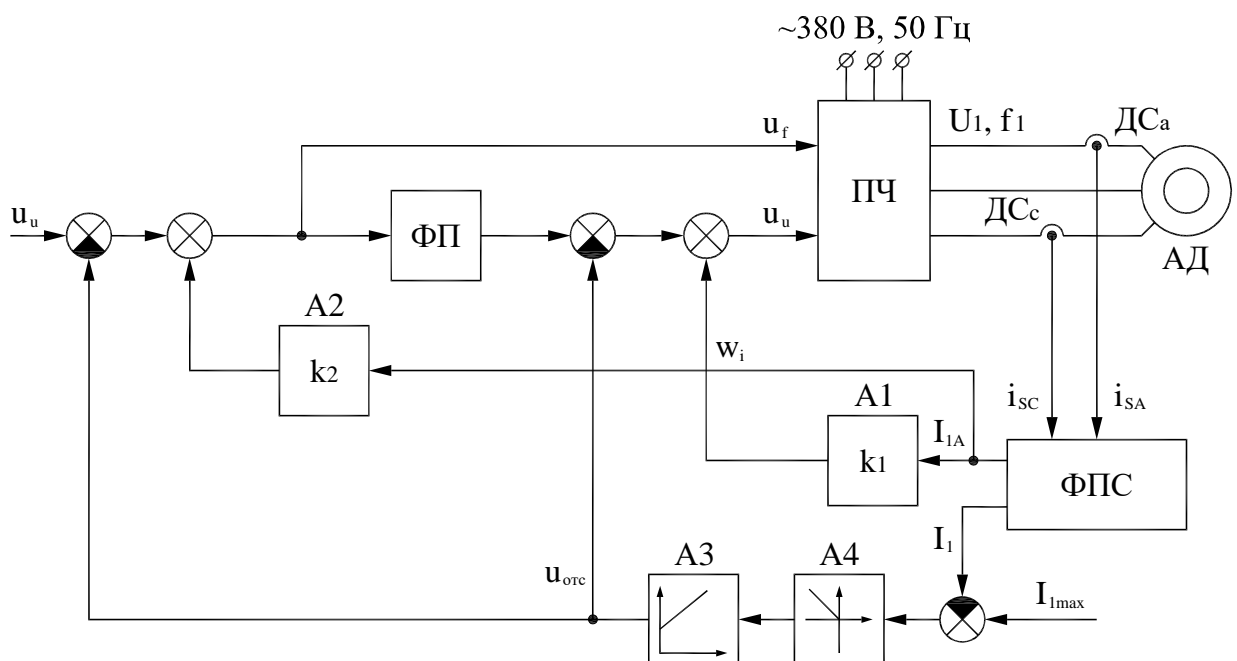


Рисунок 2.5 – Функціональна схема системи керування типу  
«перетворювач частоти – асинхронний двигун»  
зі зворотним зв'язком за струмом статора

Ступінь компенсації визначається коефіцієнтом посилення  $k_1$  кола позитивного зворотного зв'язку по струму. Очевидно, чим більше  $k_1$  тим більше буде потік при тому ж абсолютному ковзанні. Межа збільшення  $k_1$  визначається умовами стійкості замкнутої системи керування і допустимими значеннями потоку намагнічування і напруги живлення АД.

По мірі зниження частоти живлення повний опір кола намагнічення і, отже, падіння напруги в статорі АД зменшуються. Тому для стабілізації і обмеження потоку намагнічення в замкнутій по повному струму системі ступінь компенсації падіння напруги, тобто коефіцієнт  $k_1$  треба зменшувати по мірі зниження частоти вихідної напруги ПЧ.

Подібний недолік відсутній при використанні зворотного зв'язку по активній складовій струму статора. Якщо в якості сигналу зворотного зв'язку прийняти активну складову струму статора, як показано на рис. 2.5, то постійність потокозчеплення статора зберігатиметься при незмінному коефіцієнті  $k_1$ .

При частотному керуванні АД з подібним зворотним зв'язком по струму можлива реалізація механічних характеристик електропривода з підвищеною перевантажувальною здатністю по моменту і жорсткості, близькій до природної лише в невеликому діапазоні регулювання швидкості.

Вплив позитивного зворотного зв'язку по струму з боку пристрою А2 пов'язаний з одночасною дією на вихідну частоту і напругу ПЧ. За рахунок одночасного їх збільшення при зростанні навантаження на валу АД відповідно збільшується швидкість ідеального холостого ходу АД, забезпечуючи тим самим стабілізацію його швидкості, і зберігається постійність перевантажувальної здатності АД по моменту. Збільшення коефіцієнта посилення  $k_2$  пристрою А2, що сприяє підвищенню жорсткості механічної характеристики АД, обмежене умовами стійкості замкнутої



системи керування і допустимими значеннями частоти і напруги живлення АД.

Сукупність позитивних зворотних зв'язків по струму з використанням пристроїв А1 і А2 за рахунок стабілізації швидкості останніми дозволяє помітно підвищити жорсткість механічних характеристик АД і при постійному статичному навантаженні збільшити діапазон регулювання швидкості вниз від номінальної до 10:1. Перевага подібних систем полягає у відсутності тахогенератора на валу АД.

Для захисту перетворювача частоти і двигуна від перевантажень по струму використовується режим відсічення струму за допомогою суматора  $\sum_3$  і пристрою А4 (рис. 2.5). При  $I_1 > I_{1\max}$  на вхід ПІ-регулятор струму відсічення А3 поступає сигнал перевищення струму статора вище допустимого. Вихідний сигнал А3  $u_{omc}$  може впливати як на зменшення вихідної напруги ПЧ (вузол  $\sum_2$ ), так і одночасно на зменшення частоти живлення АД (вузол  $\sum_1$ ).

При дії тільки на вихідну напругу перетворювача, за умови, що регулятор А3 має інтегральний канал регулювання, за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму перетворювач ПЧ з джерела напруги переходить в режим джерела струму. Тоді при постійності струму статора АД за рахунок більшого коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора А3 (для ПІ-регулятор – нескінченно великого), ніж пристрою А1, при зниженні швидкості зменшуватиметься потік і момент двигуна, викликаючи перекидання механічної характеристики АД. Подібний режим роботи відсічення використовується лише спільно з одночасною дією на вихідну частоту перетворювача.

За рахунок сигналу від'ємного зворотного зв'язку по струму статора, що поступає на суматор  $\sum_1$ , (сильнішого, ніж з боку пристрою А2) спільно із стабілізацією струму здійснюється зниження його частоти і, отже, швидкості ідеального холостого ходу АД. Тим самим забезпечується

постійність магнітного потоку, абсолютного ковзання  $i$ , в результаті, моменту двигуна. Проте статична і динамічна точність стабілізації вказаних змінних обмежена умовами стійкості замкнутих контурів регулювання.

Збільшення діапазону регулювання за швидкістю АД можна отримати за рахунок введення в розглянуту систему керування від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю. Функціональна схема подібної системи при живленні від ПЧ як джерела напруги приведена на рис. 2.6.

Тут канал від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю включає тахогенератор ТГ як датчик зворотного зв'язку, вузол  $\Sigma_5$  підсумовування напруги керування швидкістю АД  $u_y$  і зворотного від'ємного зв'язку за швидкістю  $u_{oc}$ , регулятор абсолютного ковзання А5, блок БО обмеження його вихідної напруги  $u_{pc}$ , а також вузол  $\Sigma_4$  сумування напруги  $u_{pc}$  і результуючої напруги  $u_{y1}$  з виходу суматора  $\Sigma_1$ .

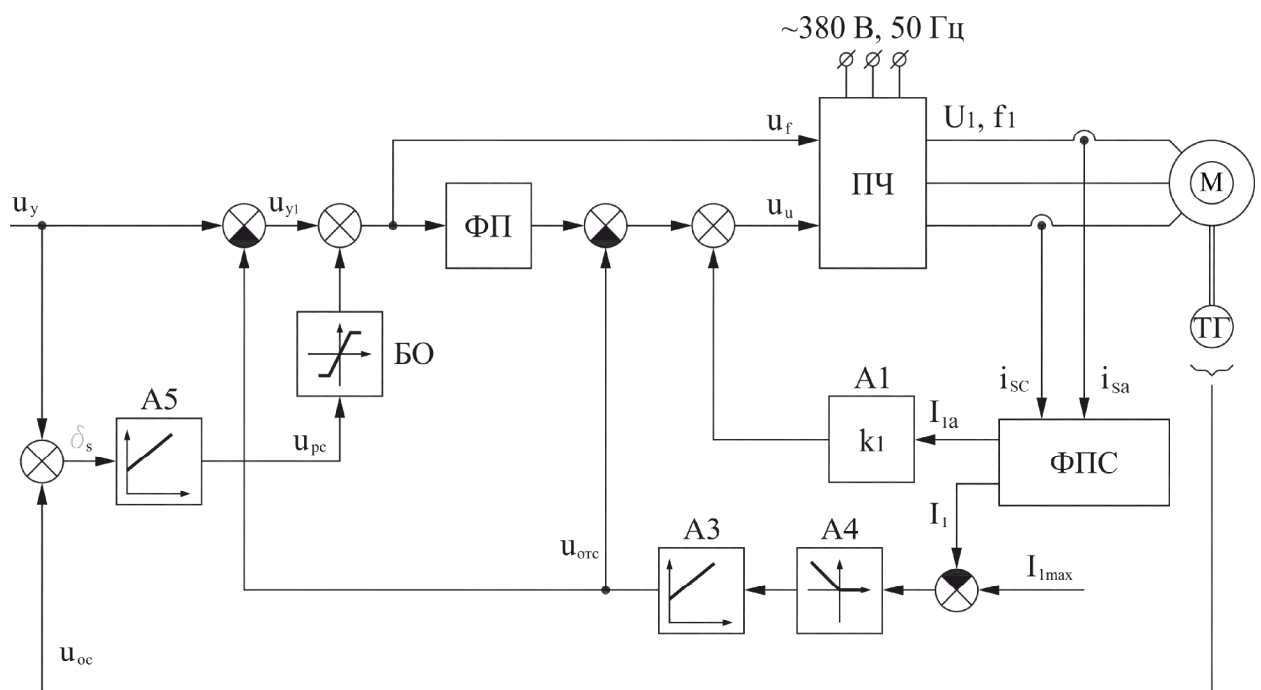


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи керування типу

«перетворювач частоти – асинхронний двигун»

зі зворотним зв'язком за швидкістю

По мірі збільшення навантаження на валу АД (від моменту  $M_1$  до моменту  $M_2$  на рис. 2.7) за рахунок зменшення швидкості АД і, як наслідок, сигналу  $u_{o.c}$  збільшується сигнал розузгодження  $\delta_s = u_y - u_{o.c} \equiv \omega_{00} - \omega \equiv s_a$ , пропорційний абсолютному ковзанню двигуна. Тут  $\omega_{00}$  – задана швидкість ідеального холостого ходу АД, що відповідає початковому сигналу керування  $u_y$ ;  $\omega$  – реальна швидкість АД при заданому навантаженні на його валу. При  $\delta_s \neq 0$  сигнал  $u_{pc}$  на виході регулятора ковзання, сумуючись з сигналом  $u_{y1} = u_y$  (при  $I_1 < I_{1\max}$ ), за рахунок інтегральної складової передавальної функції регулятора А5 забезпечує такий приріст сигналу керування  $u_f$  перетворювачем частоти, при якому частота вихідної напруги ПЧ стає рівною  $f_{10}(1 + s_a)$ . Одночасно із зміною частоти за рахунок функціонального перетворювача ФП змінюється в порівнянні з початковою напругою  $U_{10}$  і вихідна напруга перетворювача  $U_1$  (рис. 2.7, б). При цьому швидкість двигуна відновлюється до заданого значення  $\omega_{00}$ , тобто забезпечується абсолютна жорсткість механічної характеристики АД (лінія 1 на рис. 2.7, а).

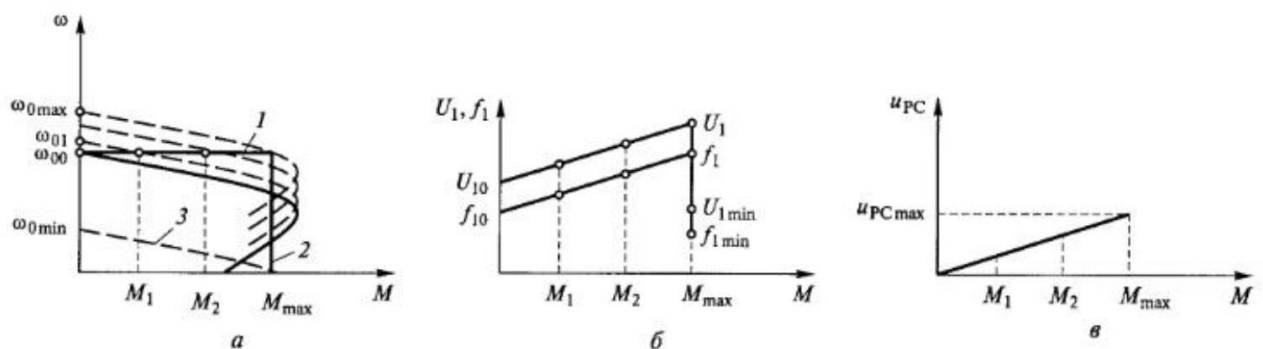


Рисунок 2.7 – Механічні характеристики (а), залежності вихідних напруг і частот перетворювача частоти (б), а також напруги регулятора швидкості (в) від моменту в системі керування типу «перетворювач частоти – асинхронний двигун» зі зворотним зв'язком за швидкістю

При перевищенні максимально допустимого струму статора АД ( $I_1 < I_{1\max}$  і, відповідно,  $M > M_{\max}$ ), регулятор ковзання має бути виключений з роботи, наприклад, шляхом обмеження його вихідного сигналу  $u_{pc}$  на рівні  $u_{pc\max}$  (рис. 2.7, в). При цьому вступають в роботу від'ємні зворотні зв'язки по струму статора з регулятором АЗ, забезпечуючи за рахунок одночасного зменшення частоти і напругу статора АД до їх мінімальних значень  $f_{1\min}$  і  $U_{1\min}$  обмеження моменту АД при  $\omega=0$  на рівні  $M_{\max}$  (лінія 2 на рис. 2.7, а). Мінімальна синхронна швидкість двигуна  $\omega_{0\min}$  буде відповідати значенням  $f_{1\min}$  і  $U_{1\min}$ , а механічна характеристика – лінії 3 (рис. 2.7, а).

### 2.3 Робота електропривода суднового сепаратора при зміні напруги

Суднова електроенергетична система є автономною, обмеженою за потужністю. Як правило, вона має кілька генеруючих агрегатів з можливістю їх паралельного використання. Регулятори напруги і частоти обертання для забезпечення стійкої паралельної роботи мають відомий статизм. При цьому допускається свобода у виборі уставки регульованих параметрів. В результаті, додатково враховуючи різну віддаленість споживачів від шин головного розподільного щита (ГРЩ), можуть бути створені умови роботи електроприводів, пов'язані з тривалим відхиленням напруги і частоти.

Розглянемо зміни характеристик асинхронного привода, які при цьому будуть виникати.

Вплив зміни напруги. Електромагнітна потужність, що передається на ротор асинхронного двигуна, визначається на підставі відомого математичного виразу:

$$P_{\text{ем}} = M\omega_0 = m_1 I_2'^2 \frac{c_1 r_2'}{s}. \quad (2.1)$$

Електромагнітний момент двигуна в цьому випадку знайдеться за формулою:

$$M = m_1 I_2'^2 \frac{c_1 r_2'}{\omega_0 s}. \quad (2.2)$$

Замінивши струм  $I_2'$  через напругу і еквівалентний опір, згідно зі схемою заміщення, отримаємо:

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 c_1 r_2' / s}{\omega_0 [(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2]}, \quad (2.3)$$

де  $x_k = x_1 + c_1 x_2'$  – індуктивний опір фази короткого замикання двигуна.

Встановлено, що при ковзаннях, більших за критичне, індуктивний опір двигуна практично зберігає незмінне значення, рівне реактивному опору короткого замикання. При ковзаннях менше критичного індуктивний опір лінійно зменшується. У розрахунках для цієї ділянки можна приймати індуктивний опір постійним і рівним номінальному значенню. Формула (2.2) показує, що електромагнітний момент пропорційний квадрату напруги.

Дуже часто для аналізу використовують відомим аналітичний виразом механічної характеристики – формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{s/s_H + s_H/s}, \quad (2.3)$$

де  $M_{\max}$  – момент асинхронного електродвигуна при критичному ковзанні  $s_H$ .

У статичному режимі роботи рушійний момент і момент опору  $M_c$  чисельно рівні  $M = M_c$ . У цих умовах, відповідно до рівняння (2.3), ковзання при будь-якому навантаженні може бути знайдено:

$$s = s_H \left[ \frac{M_{\max}}{M_c} - \sqrt{\left( \frac{M_{\max}}{M_c} \right)^2 - 1} \right]. \quad (2.4)$$

Момент двигуна, в тому числі і максимальний, пропорційний квадрату напруги, тому вираз (2.4) в умовах зміни напруги може бути представлено наступною формулою:

$$s_U = s_n \left[ \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \frac{M_{\max}}{M_c} - \sqrt{\left( \frac{U}{U_n} \right)^4 \left( \frac{M_{\max}}{M_c} \right)^2 - 1} \right]. \quad (2.5)$$

Реалізуючи спільно вирази (2.1) і (2.3) для номінального і довільного значення ковзання, можна визначити відношення наведених струмів ротора в такому вигляді:

$$\frac{I'_2}{I'_{2n}} = \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{s_k}{s_n} \right)^2}{1 + \left( \frac{s_k}{s_U} \right)^2}}. \quad (2.6)$$

Спільним рішенням (2.5) і (2.6) знаходиться відносна зміна струму ротора в умовах зміни напруги і навантаження. Вважається, що струм холостого ходу пропорційно залежить від напруги:

$$\left( \frac{I_0}{I_n} \right) U = \frac{I_0}{I_n} \frac{U}{U_n}.$$

Д. Б. Гейлером запропонована наступна наближена формула для визначення струму статора:

$$\left( \frac{I}{I_n} \right)^2 = \left( \frac{I_0}{I_n} \right)^2 \left( \frac{U}{U_n} \right)^8 + \left[ 1 - \left( \frac{I_0}{I_n} \right)^2 \left( \frac{M_c}{M_n} \frac{U_n}{U} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

На рис. 2.8 представлені криві зміни струму статора при відхиленні напруги від номінального значення. Підвищення і зниження робочої напруги викликають зміну споживаного струму в бік збільшення. При повному навантаженні виконавчого двигуна, зниження напруги на 10 % призводить до збільшеного споживання струму на 10-11%, а підвищення напруги на 10% збільшує струм на 5-6 %. Якщо навантаження не є постійним, а змінюється як функція кутової швидкості, наприклад  $M_c = k\omega^2$ , де  $k = M_n / \omega_n^2$ , то

ковзання  $s_U$  при зміні напруги буде знаходитися за рівнянням (2.5) при підстановці  $M_c = k[\omega_0(1 - s_U)]^2$ .

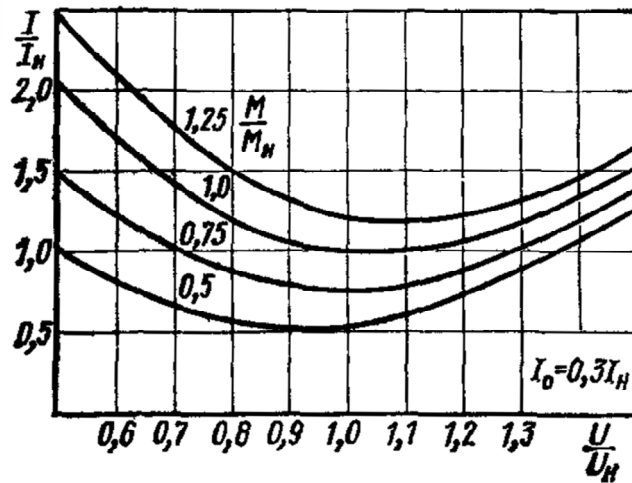


Рисунок 2.8 – Криві зміни струму статора асинхронного двигуна при відхиленні напруги мережі

Рівняння (2.5) в цьому випадку доцільніше вирішувати графічно. Задавшись рядом значень  $s_U$ , будують на одному графіку функціональні зміни лівої і правої частин рівності (2.5). Шукане рішення визначиться точкою перетину побудованих залежностей. Тут корисно помітити, що зі збільшенням напруги відбувається зниження ковзання, що визначає деяке підвищення моменту опору. Тому струм двигуна в даному випадку виросте більшою мірою, ніж при постійному моменті навантаження. При зниженні напруги одночасно зменшується і робоча швидкість привода, що призводить до деякого падіння навантаження. Отже, для приводів з вентиляторним моментом опору підвищення напруги викликає більше перевантаження двигуна, ніж при незмінному статичному моменті.

### 3.4 Перетворювач частоти MOELLER M-MAX в електроприводі суднового сепаратора «Гравітроль-1000»

Перетворювачі частоти MOELLER M-MAX призначені для перетворення однофазної або трифазної напруги змінного струму, з постійною частотою 50 Гц, в трифазну напругу з регульованою частотою.

Принцип роботи перетворювача частоти базується на основних особливостях роботи асинхронного двигуна. В асинхронному двигуні частота обертання магнітного поля  $n_1$  залежить від частоти напруги живлення. При живленні обмотки статора асинхронного двигуна трифазною напругою з частотою  $f$  утворюється так зване «обертальне» магнітне поле. Швидкість обертання цього магнітного поля визначається за відомою формулою:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p},$$

де  $p$  – число пар полюсів статора.

Перехід від швидкості обертання поля  $\omega_1$ , що вимірюється в радіанах, до частоти обертання  $n_1$ , вираженою в обертах за секунду, здійснюється за наступною формулою:

$$n_1 = \frac{60\omega_1}{2\pi},$$

де 60 – коефіцієнт перерахунку розмірності.

Підставивши в це рівняння швидкість обертання поля  $\omega_1$ , отримаємо, наступний математичний вираз:

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що частота обертання ротора асинхронного двигуна залежить від частоти напруги живлення.

Ця залежність є основою методу частотного керування.



Зміною частоти напруги живлення на вході двигуна за допомогою перетворювача регулюється частота обертання ротора.

Вихідна частота в перетворювачах частоти може змінюватися в широкому діапазоні. Вона може бути як нижче, так і вище за частоту живлячої мережі.

Перетворювачі частоти, що використовуються в регульованому електроприводі, залежно від структури і принципу роботи силової частини прийнято розділяти на два класи:

- перетворювачі частоти з явно вираженою проміжною ланкою постійного струму;
- перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком (без проміжної ланки постійного струму).

Історично першими з'явилися перетворювачі з безпосереднім зв'язком, в яких силова частина є керованим випрямлячем і виконана на тиристорах. Система керування по черзі відмикала групи тиристорів, формуючи вихідний сигнал. В даний час цей метод перетворення частоти в нових розробках перетворювачів частоти не використовується.

Всі перетворювачі частоти компанії MOELLER побудовані за схемою з явно вираженою ланкою постійного струму (рис. 2.9).

В перетворювачах цього класу використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдальна напруга ( $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ) з постійною амплітудою і частотою випрямляється у випрямному блоці (BR) і фільтрується та згладжується у блоці фільтрації (BF), в результаті виходить постійна напруга. Цей вузол називається ланкою постійного струму.

Для формування синусоїдальної змінної напруги з регульованою частотою служить блок перетворення (BD). В якості електронних ключів, за допомогою яких формується вихідний сигнал, застосовуються біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT.

Керування перерахованими блоками здійснюється по заздалегідь запрограмованому алгоритму мікропроцесорним модулем або блоком логіки (BL).

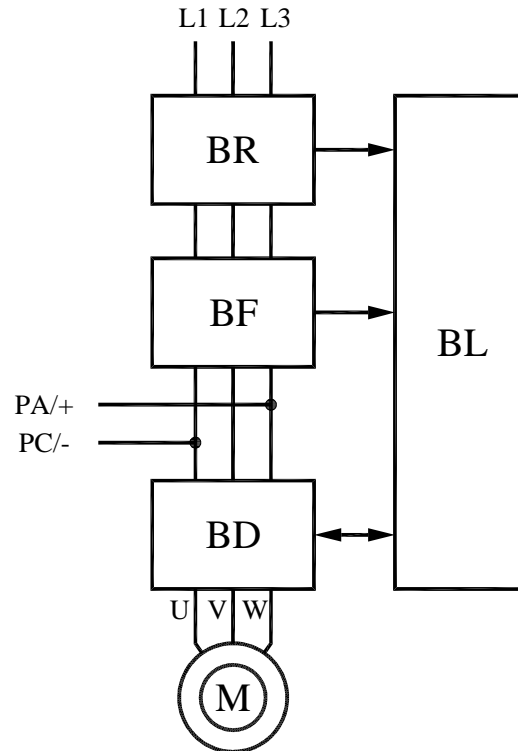


Рисунок 2.9 – Перетворювач MOELLER M-MAX з явно вираженою ланкою постійного струму

Перетворювачі частоти можуть жити від зовнішньої ланки постійного струму (рис. 2.10). В цьому випадку захист перетворювача здійснюється швидкодіючими запобіжниками. Застосовувати контактори в колах живлення від ланки постійного струму небажано, оскільки при комутації здійснюваної контакторами виникає підвищений зарядний струм. В результаті запобіжники можуть вигоріти.

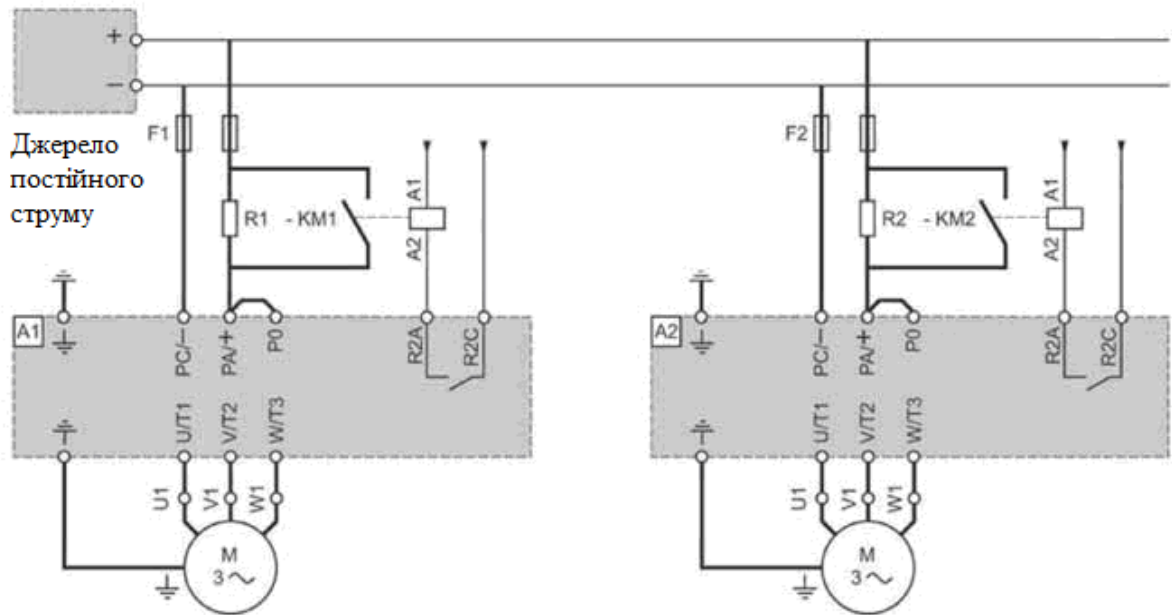


Рисунок 2.10 – Перетворювачі частоти з живленням від зовнішньої ланки постійного струму

При надмірно великому струмі запобіжники F1, F2 плавляться.

Існує два основні принципи керування перетворювачами частоти: скалярний та векторний.

Основний принцип скалярного керування полягає в зміні частоти і амплітуди живлячої напруги згідно з законом:

$$U/f^n = \text{const},$$

де  $n \geq 1$  – число, що залежить від типу виконавчого механізму в електроприводі.

Цей принцип є найбільш простим способом реалізації частотного керування. Завдяки відносно низькій вартості перетворювачів частоти із скалярним керуванням, він широко використовується для привода механізмів з діапазоном регулювання частоти обертання двигуна 1:40. Цей діапазон задовольняє вимогам до керування насосами, вентиляторами, компресорами. Важливою перевагою скалярного методу є можливість одночасного керування групою електродвигунів.

До другого типу систем керування відноситься система векторного керування, що забезпечує характеристики асинхронного електропривода, близькі до характеристик привода постійного струму. Ці властивості системи досягаються за рахунок розділення каналів регулювання потокозчеплення і швидкості обертання електродвигуна, що є недосяжним при використанні скалярного керування. При побудові вказаних систем використовується векторне представлення фізичних величин. Перетворювачі частоти, що використовують цей принцип керування, мають порівняно високу вартість і застосовуються в механізмах з підвищеними вимогами до якості регулювання швидкості, наприклад, приводи у верстатах, ліфтах тощо.

Векторне керування з застосуванням датчиків зворотного зв'язку за швидкістю забезпечує діапазон регулювання 1:1000. Застосування датчиків зворотного зв'язку за швидкістю найактуальніше в тих випадках, коли необхідно забезпечити високу стабільність швидкості при малих оборотах двигуна, точну підтримку моменту навантаження на валу двигуна навіть при нульовій швидкості і забезпечити високі динамічні характеристики в перехідних режимах.

Перетворювачі частоти MOELLER дозволяють програмно вибрати спосіб керування – скалярний або векторний, залежно від технологічних вимог.

Найбільш простий варіант використання перетворювача MOELLER, коли один перетворювач керує одним електродвигуном. В даному випадку перетворювач підключається безпосередньо до одного електронасоса і керує його роботою залежно від заданих параметрів і отримуваної від датчиків інформації. При цьому ефект від роботи електропривода визначається зниженням витрат електроенергії, збільшенням терміну служби механічної частини привода і підвищенням якості регульованого технологічного параметра, який найчастіше і визначає якість роботи електронасосної установки.

Загальні експлуатаційні дані перетворювачів частоти MOELLER M-MAX зведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Експлуатаційні дані перетворювачів MOELLER M-MAX

Найменування	Пояснення
Режим	Векторне керування або скалярне керування (перемикне)
Вихідний струм	Розрахунковий струм при макс. +50 °С; можливість перевантаження 150 % на 60 с кожні 600 с; пусковий струм 200 % на 2 с кожні 20 с
Вихідна частота	0-320 Гц; заводські налаштування 50 Гц з кроком 0,01 Гц
Тактова частота	1-16 кГц; заводська установка 6 кГц; крок прирощення 0,1 кГц
Кабель двигуна	Максимальна довжина – 30 м
Температура оточуючого середовища при експлуатації	від -10 °С до +50 °С при розрахунковому струмі
Вологість повітря	0-95 % відносної вологості без конденсата
Висота встановлення	до 1000 м над рівнем моря при 100 % розрахунковому струмі, крім того до 2000 м при 1 % зменшення на кожні 100 м
Клас захисту	IP 20
Захисні функції	Перенапруження, реєстрація короткого замикання на землю в двигуні і кабелі двигуна при пуску, перевищення температури, струм перевантаження, перевантаження двигуна, недовантаження двигуна, блокування двигуна
Дані про електромагнітну сумісність	Відповідає стандартам по електромагнітній сумісності виробничого стандарту IEC/EN 61800-3 для експлуатації в середовищах 1 і 2-го класів згідно категорій C2 і C3 з екранованим кабелем двигуна, а також вимогами категорії C4 для IT-мереж

На рис. 2.11 показаний зовнішній вигляд та структура перетворювача частоти MOELLER M-MAX. Модуль зв'язку MMX-COM-PC з вбудованим акумулятором, який може бути підключений до перетворювача, забезпечує безпосередній зв'язок з комп'ютером через інтерфейс USB і підвищує надійність зберігання даних.

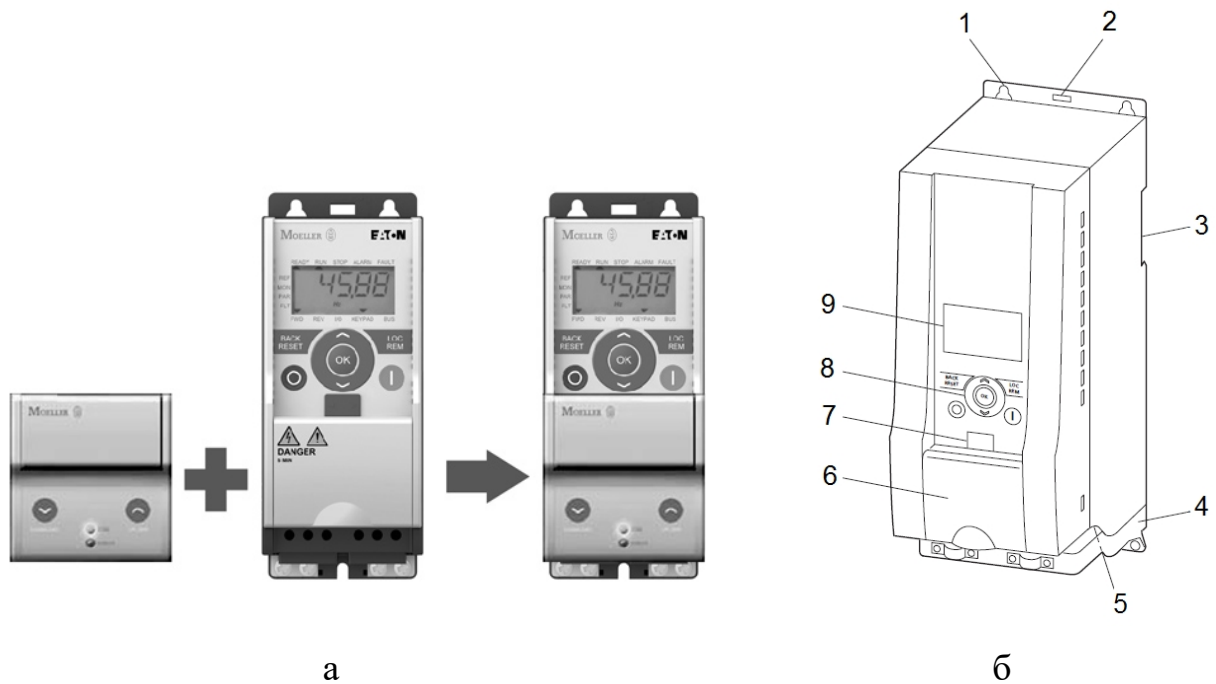


Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд та структура перетворювача MOELLER M-MAX з модулем зв'язку MMX-COM-PC:

1 – отвори кріплення (гвинтове кріплення); 2 – фіксатор (демонтаж з монтажної шини); 3 – виїмка для встановлення на монтажній шині (DIN EN 50022-35); 4 – комплектуючі електромагнітної сумісності; 5 – з'єднувальні клеми силової частини; 6 – кришка клем керування; 7 – роз'єм для додаткових блоків; 8 – модуль керування; 9 – індикаторний дисплей (рідкокристалічний)

На рис. 2.12 зображений керуючий вузол з керуючими клемами.

Для клем використовується мідний кабель з діаметром жили Ø0,5-1,5 мм<sup>2</sup>. Призначення клем показані в табл. 2.2.

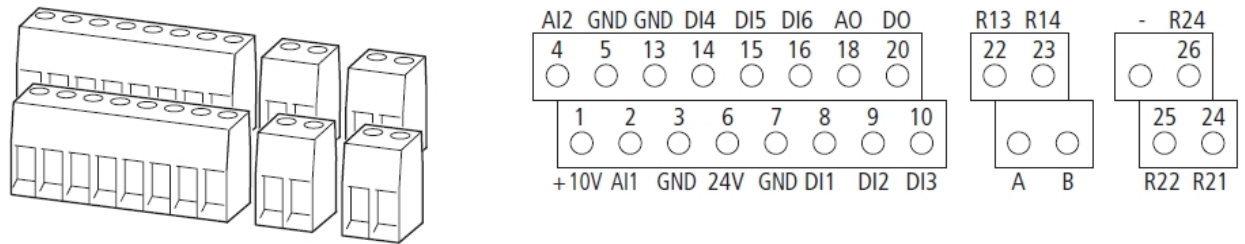


Рисунок 2.12 – Схематичне розташування і найменування клем керування

Таблиця 2.2 – Призначення клем перетворювача MOELLER M-MAX

З'єднувальна клема		Сигнал	Заводська установка	Опис
1	+10 В	Задана напруга на виході	—	Максимальне навантаження 10 мА, потенціал порівняння GND
2	AI1	Аналоговий сигнал, вхід 1	Задане значення частоти	0 - +10 В ( $R_i > 200$ кОм)
3	GND	Потенціал порівняння	—	0 В
6	24 В	Керуюча напруга для DI1-DI6, вихід (+24 В)	—	Максимальне навантаження 50 мА, потенціал порівняння GND
7	GND	Потенціал порівняння	—	0 В
8	DI1	Цифровий вхід 1	Пуск FWD, вперед	0 - +30 В ( $R_i > 12$ кОм)
9	DI2	Цифровий вхід 2	Пуск REV, назад	0 - +30 В ( $R_i > 12$ кОм)
10	DI3	Цифровий вхід 3	Фіксована частота B0	0 - +30 В ( $R_i > 12$ кОм)
4	AI2	Аналоговий вхід 2	Миттєве значення PI	0/4 – 20 мА ( $R_B = 200$ Ом)
5	GND	Потенціал порівняння	—	0 В
13	GND	Потенціал порівняння	—	0 В

Продовження таблиці 2.2 – Призначення клем перетворювача MOELLER M-MAX

14	DI4	Цифровий вхід 4	Фіксована частота В1	0 - +30 В ( $R_f=12$ кОм)
15	DI5	Цифровий вхід 5	Підтвердження помилки	0 - +30 В ( $R_f=12$ кОм)
16	DI6	Цифровий вхід 6	ПІ-регулятор вимкнений	0 - +30 В ( $R_f=12$ кОм)
18	АО	Аналоговий вихід	Вихідна частота	0/4 – 20 мА ( $R_B=200$ Ом)
20	DO	Цифровий вихід	Активно = READY	Відкритий колектор, максимальне навантаження 48 В, 50 мА, потенціал порівняння GND
A	A	RS 485 сигнал A	Обмін даними по шині	Modbus RTU
B	B	RS 485 сигнал B	Обмін даними по шині	Modbus RTU
22	R13	Реле 1, замикаючі контакти	Активно = RUN	Максимальне комутаційне навантаження: 250 В змінного струму/2 А або 250 В постійного струму/0,4 А
23	R14	Реле 1, замикаючі контакти	Активно = RUN	Максимальне комутаційне навантаження: 250 В змінного струму/2 А або 250 В постійного струму/0,4 А
24	R21	Реле 2, перемикаючі контакти	Активно = FAULT	Максимальне комутаційне навантаження: 250 В змінного струму/2 А або 250 В постійного струму/0,4 А
25	R22	Реле 2, перемикаючі контакти	Активно = FAULT	Максимальне комутаційне навантаження: 250 В змінного струму/2 А або 250 В постійного струму/0,4 А
26	R24	Реле 2, перемикаючі контакти	Активно = FAULT	Максимальне комутаційне навантаження: 250 В змінного струму/2 А або 250 В постійного струму/0,4 А

На рис. 2.13 представлені елементи вбудованого модуля керування перетворювача частоти MOELLER M-MAX.



Рідкокристалічний дисплей має задню підсвітку та складається з літеро-цифрових символів. Перехід між різними рівнями керування (I/O–KEYPAD–BUS) здійснюється кнопкою LOC REM. За допомогою кнопки з вертикальною рисою, що розташована внизу праворуч, запускається двигун в заздалегідь обраному напрямі обертання.

Кнопки вгору та вниз, що розташовані під кнопкою ОК призначені відповідно для збільшення та зменшення числових значень та відповідно пуску FWD і REV, а сама кнопка ОК призначена для підтвердження та активації вибору (збереження).

Зупинка двигуна здійснюється кнопкою, що розташована внизу ліворуч, підтвердження повідомлень про помилки і активування (утримувати натиснутою протягом 5 с) майстра вводу в експлуатацію. Кнопка зупинки активна в будь-якому режимі роботи.

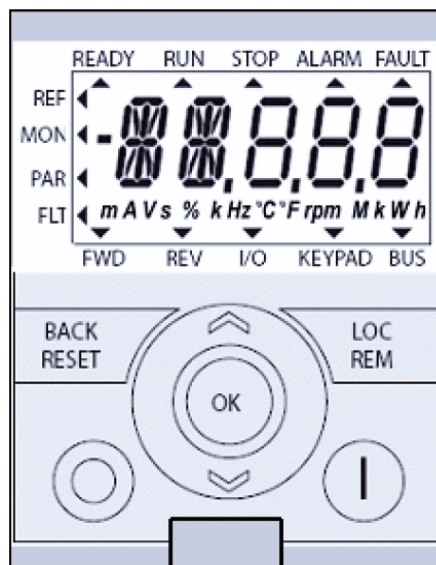


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд модуля керування з рідкокристалічним дисплеєм, додатковими кнопками і інтерфейсом

Кнопка BACK RESET призначена для переходу назад по меню, виходу з режиму правки, скидання повідомлення про помилку (скидання).



## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ І АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ

#### 3.1 Розрахунок параметрів приводного асинхронного двигуна суднового сепаратора «Гравітроль-1000»

Для суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples) з базовим електродвигуном змінного струму потужністю 7,355 кВт обираємо новий приводний асинхронний двигун серії 5A модель RA132SB2 потужністю 7,5 кВт з числом полюсів  $2p=2$  (число пар полюсів  $p_n=1$ ) і синхронною швидкістю 3000 об/хв, Основні технічні характеристики даного асинхронного двигуна приведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Паспортні дані асинхронного двигуна RA132SB2

Тип двигуна	$P_n$ , кВт	Маса, кг	$n_n$ , об/хв	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_n$ , А	$\frac{I_k}{I_n}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	$J_{\text{дв}}$ , кг×м <sup>2</sup>
RA132SB2	7,5	49	2890	0,89	0,89	15	7	2,5	3,2	0,0185

Зовнішній вигляд асинхронного двигуна показано на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Асинхронний двигун RA132SB2

Необхідно розрахувати параметри схеми заміщення асинхронної машини за номінальними паспортними даними асинхронного двигуна.

Розрахунок номінального ковзання:

$$s_H = \frac{n_s - n_H}{n_s} = \frac{3000 - 2890}{3000} = 0,037,$$

де  $n_s$  – синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля);

$n_H$  – номінальна швидкість обертання двигуна.

Розрахунок критичного ковзання:

$$s_k = (m_k + \sqrt{m_k^2 - 1}) s_H = (3,2 + \sqrt{3,2^2 - 1}) 0,037 = 0,229,$$

де  $m_k = \frac{M_k}{M_H} = 3,2$  – відношення моменту критичного моменту до номінального моменту.

Розрахунок номінальної кутової швидкості:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi n_{\text{ном}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 2890}{60} = 302,64 \text{ рад/с.}$$

Розрахунок швидкості холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50}{1} = 314,159 \text{ рад/с.}$$

Розрахунок номінального моменту:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_H}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{302,64} = 24,782 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Розрахунок критичного моменту:

$$M_k = m_k M_{\text{ном}} = 3,2 \cdot 24,782 = 79,302 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Розрахунок конструктивного коефіцієнту:

$$c_1 = 1 + \frac{L_{1s}}{L_m}.$$

Попередньо конструктивний коефіцієнт задається в діапазоні  $c = 1,02 - 1,05$  для попереднього розрахунку параметрів схеми заміщення. Після розрахунку індуктивностей необхідно порівняти отримані дані з попередньо обраними, а потім уточнити розрахунок. Як правило, за 2-3

ітерації вдається досягнути збігу прийнятого і розрахункового конструктивного коефіцієнта.

Приймаємо попередньо значення конструктивного коефіцієнта:

$$c_1 = 1,02.$$

Розрахунок механічних втрат:

$$\Delta P_m = \sqrt{3} I_H U_H \cos \varphi \eta - P_H = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,89 - 7,5 \cdot 10^3 = 320,157 \text{ Вт.}$$

Розрахунок коефіцієнту в'язкого тертя:

$$B_m = \frac{\Delta P_m}{(2\pi n_H/60)^2} = \frac{320,157}{(2 \cdot 3,142 \cdot 2890/60)^2} = 3,496 \cdot 10^{-3}.$$

Розрахунок опору статора знаходиться з виразу:

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{3}{2} \frac{(U_H/\sqrt{3})^2 (1-s_H)}{c_1 (1+c_1/s_k) m_k (P_H + \Delta P_m)} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{(380/\sqrt{3})^2 (1-0,037)}{1,02 \cdot (1+1,02/0,229) \cdot 3,2 \cdot (7,5 \cdot 10^3 + 320,157)} = 0,499 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Розрахунок опору ротора:

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{(P_H + \Delta P_m)}{(1-s_{\text{ном}}) \left( \frac{I_k}{I_H} \right)^2 I_H^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(7,5 \cdot 10^3 + 320,157)}{(1-0,037) \cdot 7^2 \cdot 15^2} = 0,245 \text{ Ом.}$$

Розрахунок індуктивності статора і ротора:

$$\begin{aligned} L_s \equiv L_r &= \frac{1}{2\pi f_H I_H} \frac{(U_H/\sqrt{3})}{\left( \sqrt{1-(\cos \varphi)^2} - \cos \varphi s_H/s_k \right)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,142 \cdot 50} \cdot \frac{(380/\sqrt{3})}{15 \left( \sqrt{1-0,89^2} - 0,89 \cdot 0,037/0,229 \right)} = 0,149 \text{ Гн.} \end{aligned}$$

Розрахунок індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$\begin{aligned} L_{1s} \equiv L_{1r} &= \frac{1}{4\pi f_H} \sqrt{\left[ (U_H/\sqrt{3}) / (i_k I_H) \right]^2 - (R_s + R_r)^2} = \\ &= \frac{1}{4 \cdot 3,142 \cdot 50} \sqrt{\left[ (380/\sqrt{3}) / (7 \cdot 15) \right]^2 - (0,499 + 0,245)^2} = 3,107 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,} \end{aligned}$$

$$\text{де } i_k = \frac{I_k}{I_n} = 7.$$

Розрахунок взаємодукції:

$$L_m = L_s - L_{1s} = 0,149 - 3,107 \cdot 10^{-3} = 0,145 \text{ Гн}.$$

Перераховуємо конструктивний коефіцієнт:

$$c_1 = 1 + \frac{L_{1s}}{L_m} = 1 + \frac{3,107 \cdot 10^{-3}}{0,145} = 1,021 \approx 1,02.$$

Збіг прийнятого і розрахункового конструктивного коефіцієнта  $c_1$  досягнуто. Отже, проведений розрахунок можна вважати прийнятним.

Для побудови механічної характеристики асинхронного двигуна RA132SB2 потужністю 7,5 кВт і частотою обертання 2980 об/хв скористаємося спрощеною формулою залежності моменту від ковзання:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}.$$

В спеціалізованому програмному забезпеченні, наприклад, MathCAD можна записати наступні програмні операції:

$$s := 0.0001, 0.00015 \dots 1 \quad M(s) := \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Механічна характеристика двигуна дає залежність частоти обертання ротора від моменту на валу  $n=f(M_2)$ . Оскільки при навантаженні момент холостого ходу малий, то  $M_2 \approx M$  і механічна характеристика може бути представлена залежністю  $n=f(M)$ . Якщо врахувати взаємозв'язок  $s=(n_1-n)/n_1$ , то механічну характеристику можна отримати шляхом зображення її графічної залежності у координатах  $n$  і  $M$  або  $s$  і  $M$ . Графік механічної характеристики асинхронного двигуна RA132SB2 зображено на рис. 3.2.

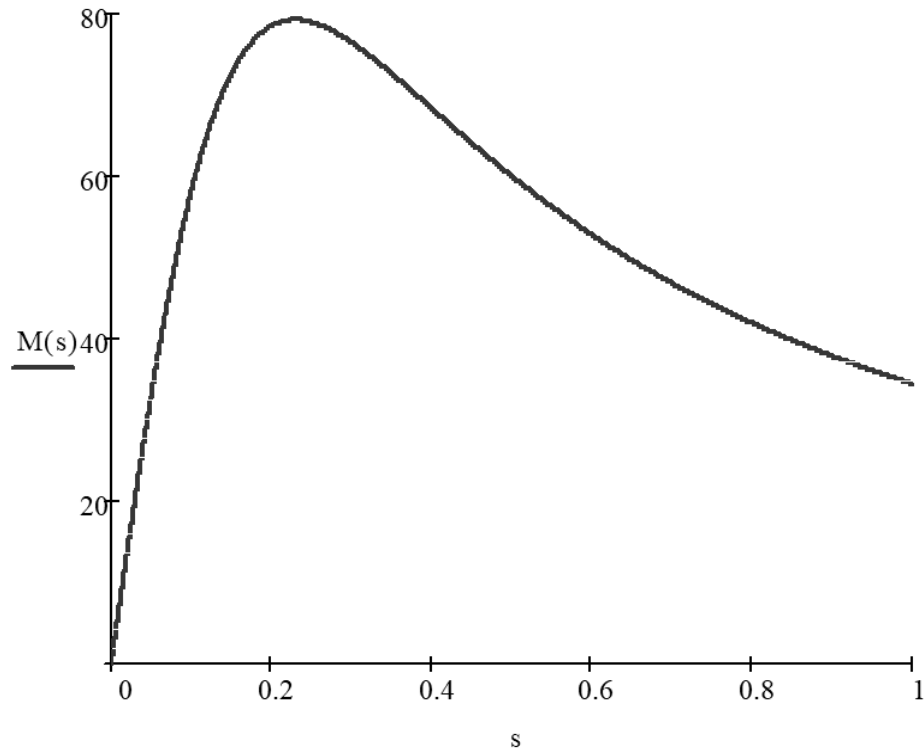


Рисунок 3.2 – Механічна характеристика асинхронного двигуна RA132SB2 для суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples)

### 3.2 Вибір перетворювача частоти електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000»

Для розробленої системи керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples) необхідно обрати якісний та надійний перетворювач частоти. Добре зарекомендували себе перетворювачі частоти серії M-MAX фірми MOELLER. Конкретну модель перетворювача частоти MOELLER M-MAX необхідно обрати за допомогою табл. 3.2.

Технічні характеристики перетворювачів M-MAX, що працюють при трифазному струмі напругою 400 В (323-528 В) та частотою 50 Гц (45-66 Гц) наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики перетворювачів MOELLER M-MAX

Модель перетворювача	Розрахунковий струм, $I_c$	Струм перевантаження (150 %), $I_{150}$	Співвідношена потужність електродвигуна	Розмір перетворювача
MMX34AA1D3F0-0	1,3	2	0,37	FS1
MMX34AA1D9F0-0	1,9	2,9	0,55	FS1
MMX34AA2D4F0-0	2,4	3,6	0,75	FS1
MMX34AA3D3F0-0	3,3	5	1,1	FS1
MMX34AA4D3F0-0	4,3	6,5	1,5	FS2
MMX34AA5D6F0-0	5,6	8,4	2,2	FS2
MMX34AA7D6F0-0	7,6	11,4	3	FS3
MMX34AA9D0F0-0	9	13,5	4	FS3
MMX34AA012F0-0	12	18	5,5	FS3
MMX34AA014F0-0	14	21	7,5	FS3

Враховуючи потужність обраного приводного асинхронного двигуна RA132SB2 (7,5 кВт) суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples) обираємо модель перетворювача частоти MMX34AA014F0-0 фірми MOELLER потужністю 7,5 кВт.

### **3.4 Синтез структури та розрахунок регуляторів системи керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000»**

Скалярні системи керування є одним з видів частотного керування, яке досить поширене в асинхронному електроприводі. Скалярні системи керування характеризуються технічною простотою вимірювання та регулювання змінних асинхронного двигуна.

Формування необхідних статичних і динамічних властивостей асинхронного частотно-регульованого електропривода можливе лише в замкнутій системі регулювання його координат.



Функціональна схема системи керування подібної системи крім асинхронного двигуна та керованого перетворювача частоти (ПЧ) містить регулятори Р і датчики Д змінних електропривода (рис. 3.3). Дана система частотно-керованого електропривода є нелінійною, а тому аналітичний розрахунок регуляторів можна виконати досить наближено.

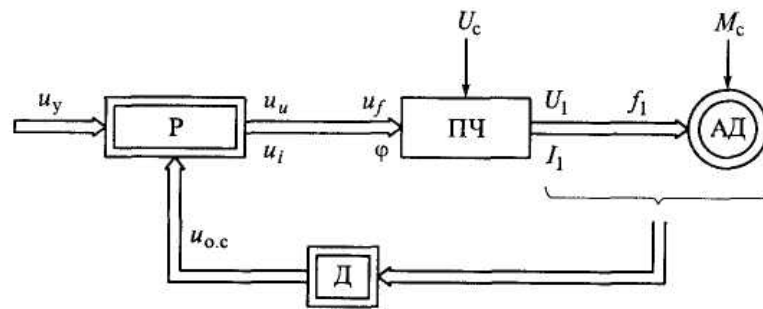


Рисунок 3.3 – Функціональна схема замкнутої системи керування частотно-керованого електропривода зі скалярним керуванням

На рис. 3.4 зображено структурну схему лінеаризованої системи при роботі асинхронного двигуна на ділянці механічної характеристики в межах значень абсолютного ковзання  $s_a \leq s_k$ .

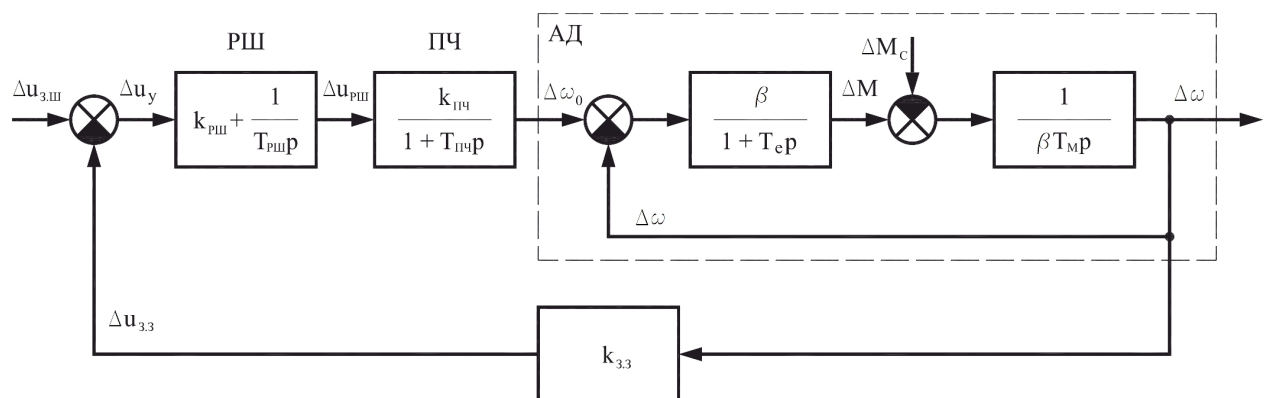


Рисунок 3.4 – Спрощена структурна схема системи ПЧ – АД зі зворотним зв'язком по швидкості

На структурній схемі (рис. 3.4) прийняті наступні позначення:

$\beta$  – модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна;

$T_e$  – еквівалентна електромагнітна постійна часу електрокіл статора та ротора асинхронного двигуна;

$T_m$  – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна.

Розрахунок модуля жорсткості лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна:

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0\text{ннo}} S_k};$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 79,302}{314,159 \cdot 0,229} = 2,291.$$

Розрахунок еквівалентної електромагнітної постійна часу електрокіл статора та ротора асинхронного двигуна:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0\text{есл.но}} S_k},$$

де  $\omega_{0\text{есл.но}}$  – кутова швидкість електромагнітного поля асинхронного двигуна при його номінальній частоті живлення  $f_{1\text{ннo}} = 50 \text{ Гц}$  ( $\omega_{0\text{есл.но}} = 2\pi f_{1\text{ннo}} = 2 \cdot 3,142 \cdot 50 = 314,159 \text{ с}^{-1}$ ).

$$T_e = \frac{1}{314,159 \cdot 0,229} = 0,014 \text{ с.}$$

Для асинхронних двигунів загальнопромислового виконання  $s=0,05\dots 0,5$  (менші значення характерні для потужних двигунів),  $T_e=(0,006\dots 0,06) \text{ с}$ ;

Розрахунок електромеханічної постійної часу  $T_m$  асинхронного двигуна:

$$T_m = \frac{J}{k_\omega} = \frac{J}{\beta},$$

де  $J$  – зведений момент інерції двигуна.

$$T_m = \frac{0,0185}{2,291} = 8,076 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Розрахунок передавального коефіцієнта перетворювача частоти  $k_{пч}$ :

$$k_{пч} = \frac{\Delta\omega_0}{\Delta u_{рш}} = \frac{2\pi\Delta f_1}{p_{п}\Delta u_{рш}},$$

де  $p_{п}=1$  – кількість пар полюсів двигуна (синхронна частота ротора 3000 об/хв).

При роботі асинхронного двигуна в зоні частот  $f_1 \leq f_{1ннo} = 50$  Гц і номінальному сигналі керування перетворювачем  $u_{у.ПЧном}$  співвідношення

$$\frac{\Delta f_1}{\Delta u_{рш}} = \frac{f_1}{u_{у.ПЧном}};$$

$$k_{пч} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50}{1 \cdot 10} = 31,416.$$

Постійна часу  $T_{пч}$  електрокола керування перетворювача частоти, що при високих частотах модуляції вихідної напруги промислових перетворювачів частоти (2...50 кГц) не перевищує 0,001 с.

Обираємо постійну часу перетворювача частоти рівною  $T_{пч}=0,001$  с.

Передавальна функція ПІ-регулятора швидкості

$$W_{рш}(p) = \frac{\Delta u_{рш}}{\Delta u_y} = k_{рш} + \frac{1}{T_{рш}p} = \frac{k_{рш}T_{рш}p + 1}{T_{рш}p}.$$

Передавальна функція ланцюга зворотного зв'язка за швидкістю асинхронного двигуна:

$$W_{3.3}(p) = \frac{\Delta u_{3.3}}{\Delta \omega} = k_{3.3}.$$

При номінальному сигналі керування електропривода, рівному  $u_{3.чном}$ , і відповідній йому номінальній швидкості асинхронного двигуна:

$$k_{3.3} = \frac{u_{3.ном}}{\omega_{ном}}.$$

$$k_{3.3} = \frac{1}{302,64} = 3,304 \cdot 10^{-3}.$$

У відповідності зі структурною схемою асинхронного двигуна його результуюча передавальна функція стосовно відхилення  $\Delta\omega_0$  має вигляд:

$$W_d(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_0} = \frac{1}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}.$$

При  $T_m \geq 4T_e$  передавальна функція асинхронного двигуна (коливальна ланка) може бути представлена у вигляді двох аперіодичних ланок:

$$W_d(p) = \frac{1}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)},$$

де

$$\frac{1}{T_{01}} = \frac{1}{2T_e} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4T_e}{T_m}} \right); \quad \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{2T_e} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4T_e}{T_m}} \right).$$

Приймаємо  $T_m = 4T_e = 4 \cdot 0,014 = 0,056$ , тоді

$$T_{01} = \frac{1}{\frac{1}{2T_e} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4T_e}{T_m}} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,014} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,014}{0,056}} \right)} = 0,028 \text{ с};$$

$$T_{02} = \frac{1}{\frac{1}{2T_e} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4T_e}{T_m}} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,014} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,014}{0,056}} \right)} = 0,028 \text{ с}.$$

Якщо віднести постійні  $T_{02}$  і  $T_{пч}$  до малих постійних, що не компенсуються, і в якості оцінки їхнього впливу прийняти:

$$T_\mu = T_{02} + T_{пч} = 0,028 + 0,001 = 0,029 \text{ с},$$

то при налаштуванні електропривода на модульний оптимум постійна інтегрування та коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора швидкості визначаються за формулами:

$$T_{PII} = k_{3,3} k_{пч} a_\mu T_\mu;$$

$$T_{PII} = 3,304 \cdot 10^{-3} \cdot 31,416 \cdot 1 \cdot 0,029 = 2,992 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$k_{PII} = \frac{T_{01}}{T_{PII}}; \quad k_{PII} = \frac{0,028}{2,992 \cdot 10^{-3}} = 9,299.$$

### 3.5 Дослідження динаміки системи керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000»

Дослідження динаміки системи передбачає вивчення електромагнітних перехідних процесів в асинхронному двигуні має теоретичне і практичне значення, оскільки виключення з розгляду їх впливу змінює дійсне представлення про характер перехідних процесів в асинхронному електроприводі. В літературних джерелах йдеться про те, що максимальні значення перехідного моменту можуть суттєво перевищувати номінальний момент двигуна при пуску в 2-4 рази, при реверсуванні в 8-15 разів, що слід враховувати при аналізі властивостей конкретного електропривода.

Програма MATLAB – це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Вона містить у собі обчислення, візуалізацію і програмування у зручному вигляді, де задачі й розв’язки виражаються у формі, близькій до математичної. Типовим використанням MATLAB є математичні обчислення; створення алгоритмів; моделювання; аналіз даних, дослідження і візуалізація; наукова й інженерна графіка; розробка додатків, зокрема створення графічного інтерфейсу.

Simulink – це інтерактивна система для моделювання динамічних систем. Вона являє собою середовище, що дозволяє моделювати процес з переміщенням блоків та їх маніпуляцією для побудови перехідних процесів за структурною схемою. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатомірними системами.

На рис. 3.5 представлено схему для моделювання у програмі Simulink, за якою побудовано графік перехідного процесу за швидкістю на рис. 3.6.

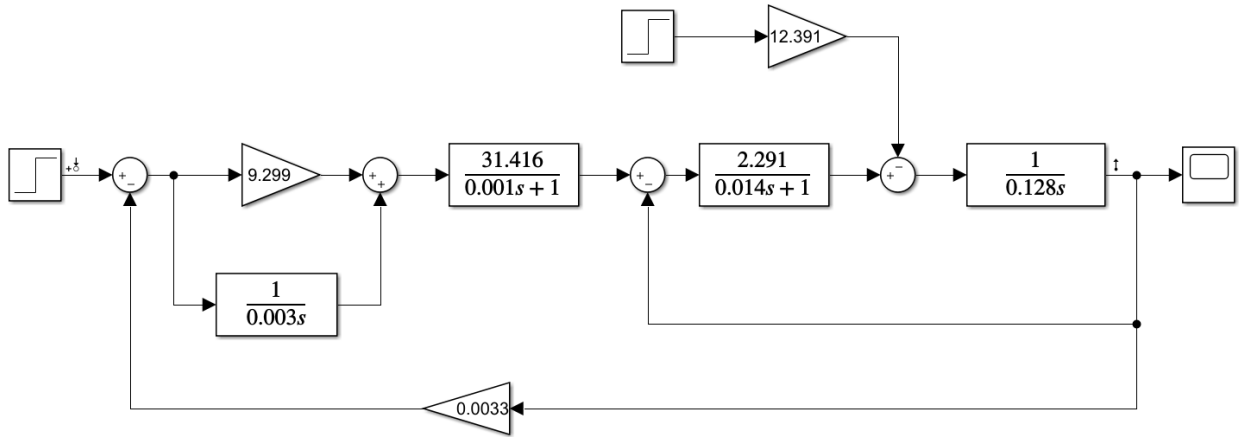


Рисунок 3.5 – Схема імітаційної моделі  
при  $k_{рш}=9,299$ ;  $T_{рш}=0,003$  с

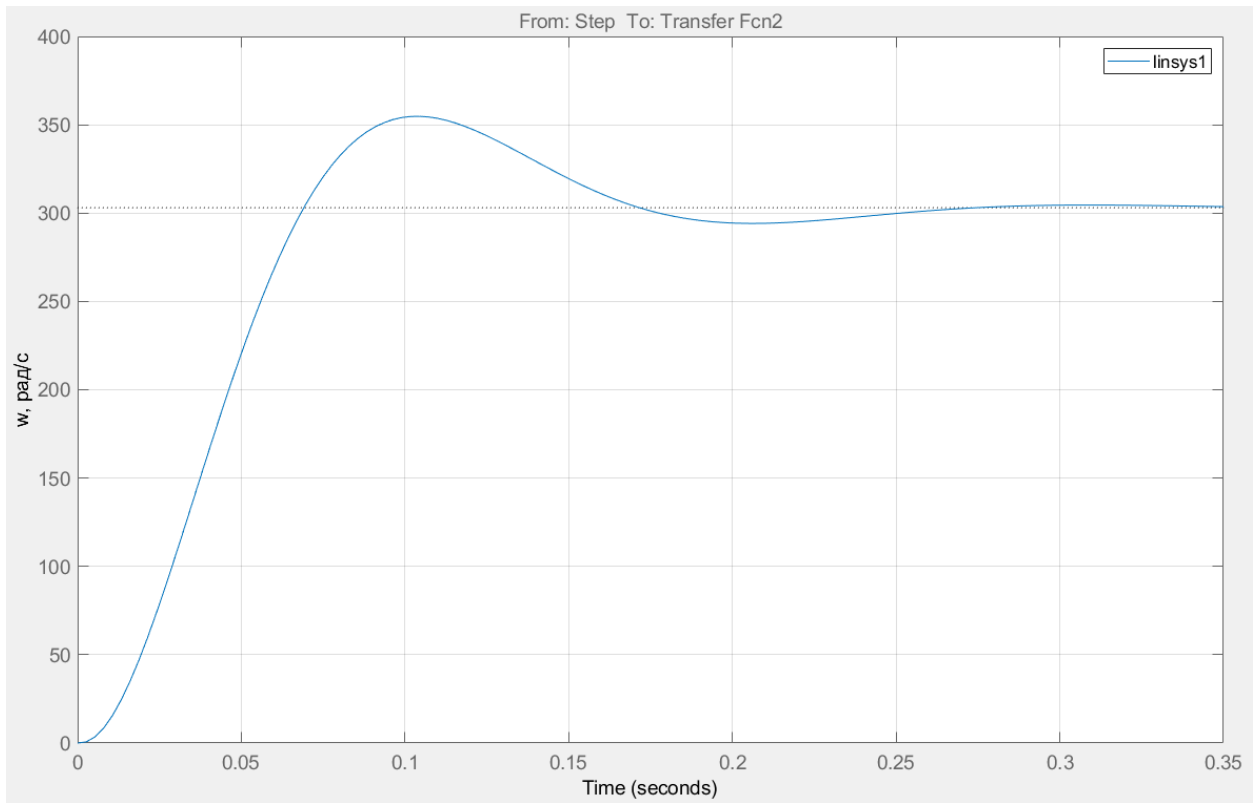


Рисунок 3.6 – Перехідний процес за швидкістю  
при  $k_{рш}=9,299$ ;  $T_{рш}=0,003$  с

Перехідний процес (рис. 3.6) побудовано при наступних параметрах регулятора швидкості: при  $k_{рш}=9,299$ ;  $T_{рш}=0,003$  с. З даного графіка видно,

що час перехідного процесу становить  $t_{\text{пн}}=0,35$  с, а перерегулювання  $\sigma=17\% < \sigma_{\text{допустиме}}=30\%$  (в межах допустимого значення).

На рис. 3.7 і рис. 3.9 представлено схеми для моделювання у програмі Simulink відповідно при збільшеному та зменшеному в 10 разів значенні коефіцієнта передачі пропорційної частини ПІ-регулятора швидкості  $k_{\text{рш}}$ .

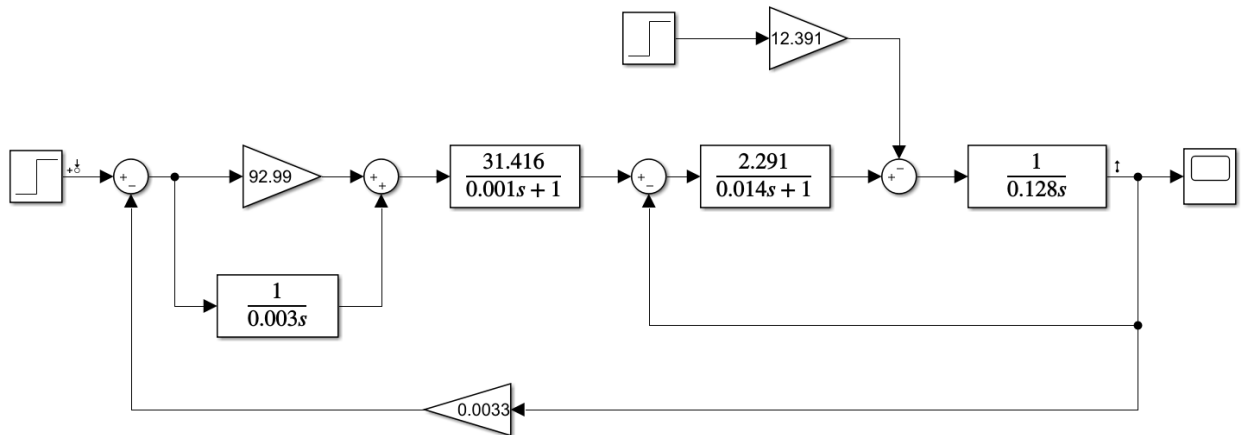


Рисунок 3.7 – Схема імітаційної моделі

при  $k_{\text{рш}}=92,99$ ;  $T_{\text{рш}}=0,003$  с

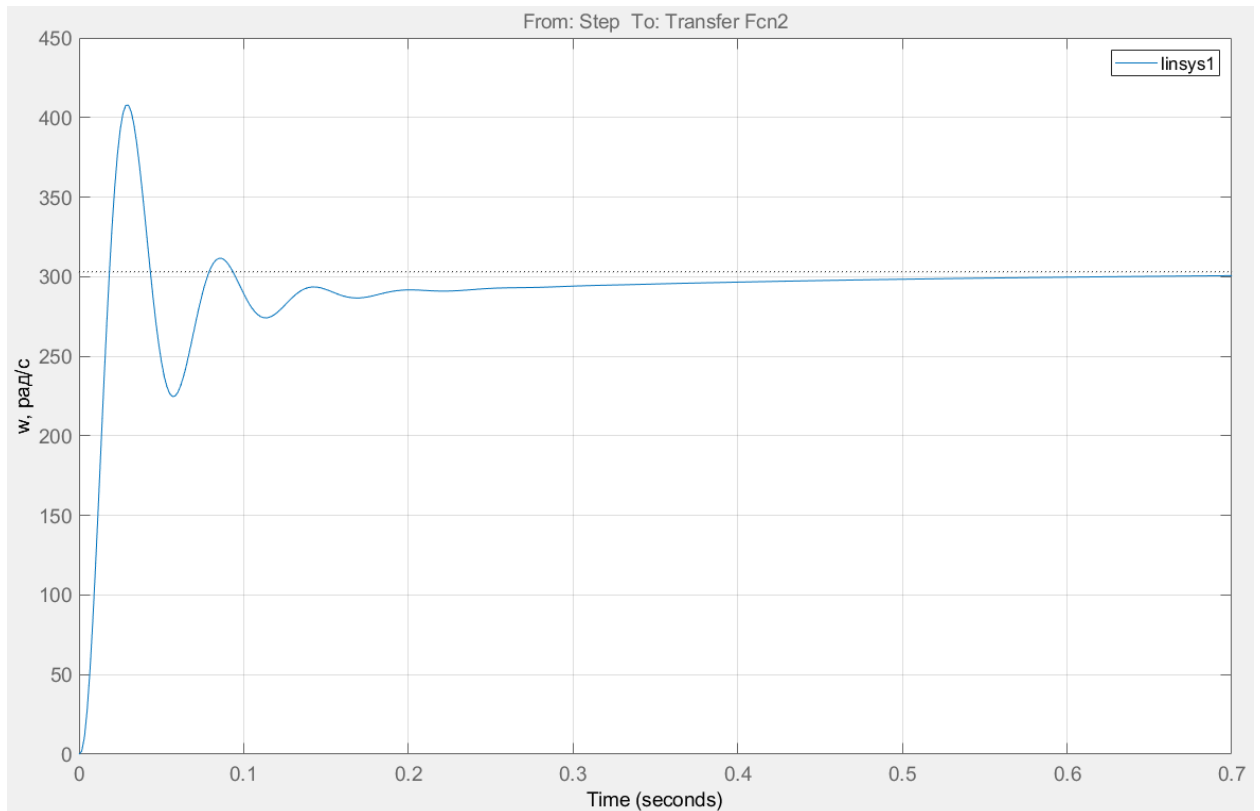


Рисунок 3.8 – Перехідний процес за швидкістю

при  $k_{\text{рш}}=92,99$ ;  $T_{\text{рш}}=0,003$  с

Графіки перехідних процесів за швидкістю при збільшеному та зменшеному в 10 разів значенні коефіцієнта передачі пропорційної частини ПІ-регулятора швидкості  $k_{рш}$  наведено на рис. 3.8 і рис. 3.10 відповідно.

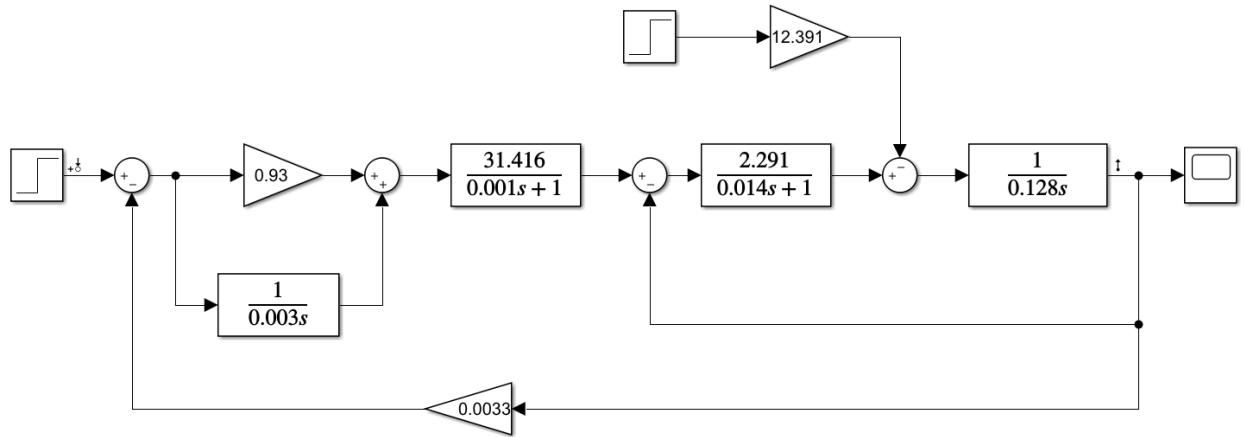


Рисунок 3.9 – Схема імітаційної моделі

при  $k_{рш}=0,93$ ;  $T_{рш}=0,003$  с

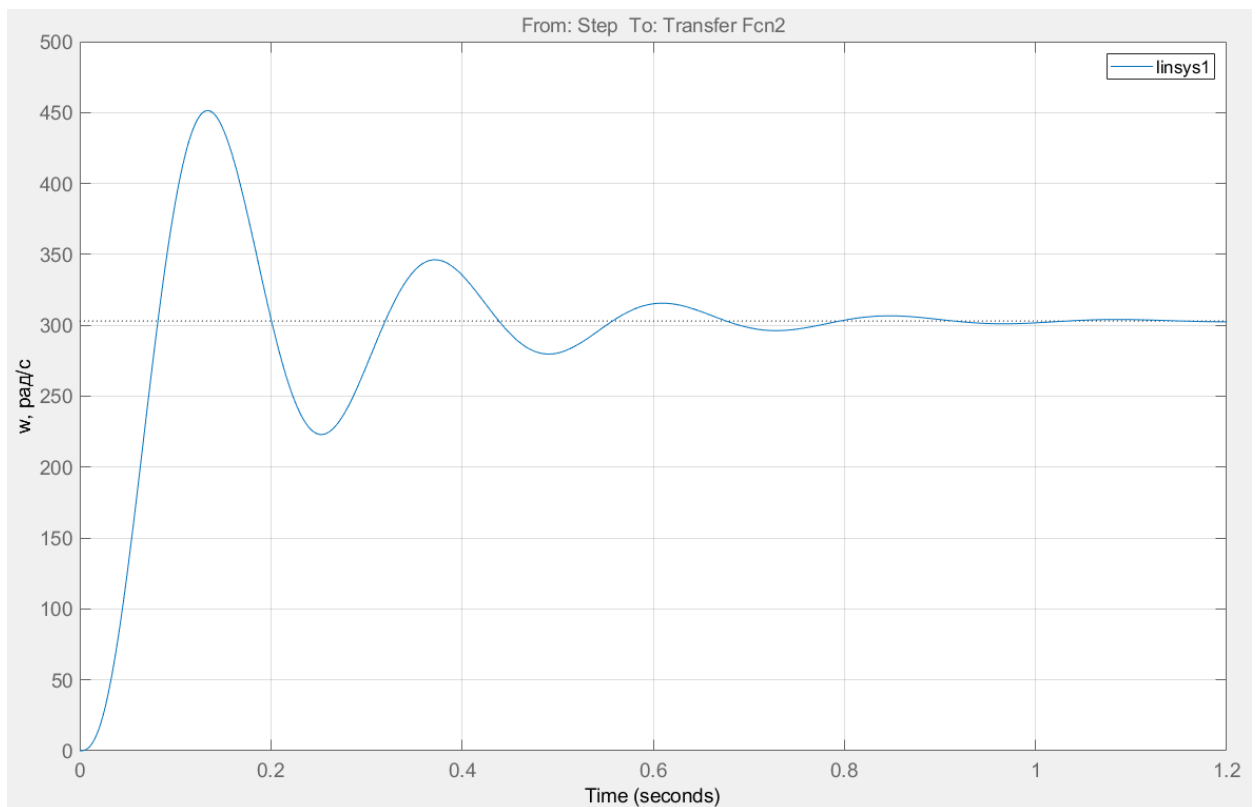


Рисунок 3.10 – Перехідний процес за швидкістю

при  $k_{рш}=0,93$ ;  $T_{рш}=0,003$  с



Перехідний процес за швидкістю (рис. 3.8) побудовано при наступних параметрах регулятора швидкості: при  $k_{рш} = 92,99$ ;  $T_{рш} = 0,003$  с. З даного графіка видно, що час перехідного процесу становить  $t_{пш} = 0,7$  с, перерегулювання становить  $\sigma = 34,6 \% > \sigma_{\text{допустиме}} = 30 \%$  (перевищило допустиме значення).

Перехідний процес за швидкістю (рис. 3.10) побудовано при наступних параметрах регулятора швидкості: при  $k_{рш} = 0,93$ ;  $T_{рш} = 0,003$  с. З даного графіка видно, що час перехідного процесу становить  $t_{пш} = 1,2$  с, перерегулювання становить  $\sigma = 49 \% > \sigma_{\text{допустиме}} = 30 \%$  (перевищило допустиме значення).

Аналізуючи отримані результати, обираємо графік перехідного процесу за швидкістю на рис. 3.6 при наступних налаштування регулятора швидкості  $k_{рш} = 9,299$ ;  $T_{рш} = 0,003$  с з показниками якості керування: час перехідного процесу становить  $t_{пш} = 0,35$  с, а перерегулювання  $\sigma = 17 \%$ .

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ З СУДЕН ВІДПОВІДНО ДО КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78**

#### **4.1 Загальні питання по запобіганню забруднення з суден**

Морський транспорт є одним із джерел забруднення морського середовища. До основних експлуатаційних суднових забруднювачів можуть бути віднесені нафтопродукти та стічні води, сміття і викиди в атмосферу, які можуть впливати на невідповідний рівень легко вразливої природи.

Неконтрольовані та нерегульовані викиди в моря та водойми різних відходів та нафтопродуктів, катастрофічні розливи нафти та шкідливі речовини, забруднення атмосфери озоноруйнуючими та іншими токсичними речовинами створюють умови незворотності процесів в екосистемах планет, що представляють небезпеку біосфері, життю та здоров'ю людей. З метою усунення негативних наслідків, що визиваються забрудненням навколишнього середовища, були прийняті та ратифіковані міжнародні угоди, а в багатьох країнах розроблені також і національні програми щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища та в першу чергу морів, водойм та атмосфери.

Міжнародною морською організацією (ІМО), створеною органом ООН, у 1973 році була прийнята Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73 щодо запобігання забрудненню судів. Конвенція МАРПОЛ 73 та протокольні зміни до неї, прийняті в 1978 та 1997 роках, представляють собою єдиний документ, що називається Конвенцією МАРПОЛ 73/78 (далі за текстом "Конвенція"). Конвенцією встановлені положення правового, організаційного та технічного характеру, які передбачають вимірювання заходів щодо скорочення та запобігання забрудненню повітряних середовищ, морів та водойм речовинами, що утворюються в процесі експлуатації суден.

Усі судна, побудовані після вступу в силу міжнародної Конвенції, повинні задовольняти її вимоги щодо охорони навколишнього середовища. Судна, побудована до цієї дати, повинні бути піддані модернізації з метою приведення їх у відповідність із положеннями Конвенції та національних правил щодо охорони навколишнього середовища.

## 4.2 Очищення льяльних вод

Поняття "ляльної води" важко піддається чіткому визначенню. 50 років тому льяльні води склалися в основному із змішаних вод та дизельного палива. В даний час у їх складі крім води можуть входити важкі сорти органічних палив, густина яких іноді співмірна з густиною води ( $0,84\text{--}0,98\text{ г/см}^3$ ), змащувальне мастило, мастило для гідравлічних систем, миючі препарати, присадки до мастила, хімікати, каталітичні частинки, сажа та інші тверді частинки (шлам). Сьогодні очистка льяльної води передбачає її очищення:

- від крапельних нафтопродуктів;
- від розчинених нафтопродуктів;
- від зважених і дискретних частин паливних шламів та механічних сумішей.

Скидання льяльної води із вмістом нафтопродуктів (НП) більше 15 об'ємних частинок на мільйон частинок води ( $15\text{ млн}^{-1}$ ), або 15 ppm (англ. *Parts per million*) у відкритому морі, а також у життєво важливі водойми (з ще меншою концентрацією) строго заборонені міжнародним законодавством і карається великими штрафами. Деякі уряди, регіональні та місцеві органи влади встановлюють ще більш жорсткі вимоги. Наприклад, у територіальних водах США та в Балтійському морі скидання льяльної води, що пройшла очищення, взагалі заборонено.

Методи контролю за забрудненнями, що використовуються державними агентствами та іншими повноцінними органами, стають все більш ефективними (навіть у нічні години доби) і сьогодні включають як повітряні, так і космічні засоби визначення фактів різниці вуглеводнів у Світовому океані.

На даний момент за даними космічної зйомки 30 % площі Світового океану покрито нафтової плівкою. При цьому доля забруднення від аварійного танкерного флоту становить лише 12 %. Основну роль у забруднення Світового океану (27 %) вносять нафтовмісні суміші (НВС), що скидаються суднами в море, типовим прикладом яких є води з шламових цистерн паливних та мастильних сепараторів, а також брудний баласт танкерів.

### **4.3 Фільтруюче обладнання**

В даний час для очищення льяльних вод морських суден, кіль яких був закладений до 01.01.2005 р., дозволяється використовувати фільтруюче обладнання (ФО) очисною здатністю до  $15 \text{ млн}^{-1}$  і яке відповідає вимогам резолюцій ІМО А.393 (Х) і МЕРС 60 (33). На суднах, кіль яких був закладений після 01.01.2005 р., дозволяється використовувати ФО, що відповідає вимогам Резолюції ІМО МЕРС 107 (49), що вступило в силу з 01.01.2005 р. Всі ці установки в більшості своїй відстійно-коалісцентного типу і повністю автоматизовані. Вони дуже прості за конструкцією, не мають рухомих частин, їх працездатність не залежить від крену і диференту судна. У ступенях очищення води ФО, як правило, використовуються змінні коалісцентні фільтроелементи, ресурс яких залежить від нафтовмісту і кількості зважених речовин у воді, що очищується. Принципова схема ФО з урахуванням вимог Регістру представлена на рис. 4.1.

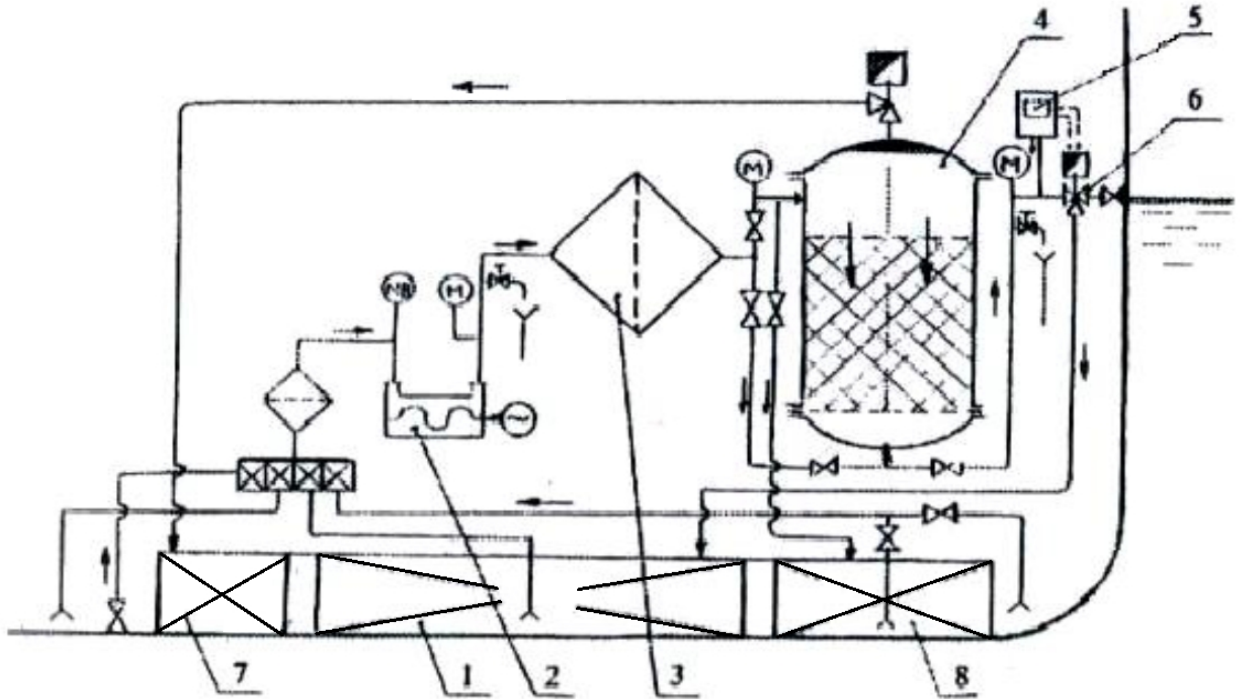


Рисунок 4.1 – Принципова схема фільтрувального обладнання для очищення  
льяльних вод

На рис. 4.1 використано наступні позначення:

- 1 – збірний танк льяльних вод;
- 2 – насосний агрегат;
- 3 – механічний фільтр;
- 4 – нафтоводяний сепаратор з фільтром доочищення;
- 5 – прилад контролю якості очищення води або сигналізатор граничного нафтовмісту в скиданні;
- 6 – триходовий електромагнітний клапан;
- 7 – цистерна відсепарованих нафтопродуктів;
- 8 – цистерна промивної води.

По мірі накопичення нафтовмісної води в льялах машинного відділення вона перекачується осушувальним насосом в збірний танк 1, де здійснюється попередній відстій крапельних нафтопродуктів. Товщина шару вуглеводнів в танку збільшується. Тому відстояний нафтопродукт періодично відкачують з цього танка, щоб він не потрапляв в сепаратор 4 і не забруднював його

коалісцентні фільтроелементи або фільтруючий матеріал (сорбент). Перед насосним агрегатом іноді встановлюють механічний фільтр грубого очищення. В даний час на морських суднах для очищення льяльних вод застосовуються фільтруюче обладнання (ФО) різних типів як вітчизняних так і зарубіжних виробників (США, Німеччина, Японія, Південна Корея, Литва та ін.). Пристрій, принцип роботи та аналіз досвіду технічної експлуатації даних установок детально викладено в деяких окремих дослідженнях.

Одним з поширених методів поділу нафтоводяної суміші (НВС) при очищенні льяльних вод є метод коалісцентної фільтрації води, що очищається, при якому краплинні нафтопродукти (НП) в обсязі води, що очищається, налипають і утворюють плівку на поверхні різних коалісцентних матеріалів.

При фільтрації води, що очищається через такі матеріали, що володіють гідрофобною властивістю, відбувається укрупнення крапель НП за рахунок їх злиття на олеофільні (пористі) поверхні з утворенням плівки нафтопродукту (НП). На виході з таких пристроїв (деемульгатора) на їх зовнішній поверхні (в напрямку потоку води) відбувається відрив утвореної плівки НП, формування і спливання більших крапель НП в обсязі очищеної води. Тому наявність в сепараторі даного типу ємності відстоювання після коалісцентного пристрою (деемульгатора) є необхідною умовою для поділу НВС.

Цей метод очищення льяльних вод на морських суднах дозволяє отримати нафтовміст в скиданні до  $15 \text{ млн}^{-1}$ , що відповідає гранично допустимій концентрації (ГДК). Прикладом простого в керуванні і надійного в експлуатації фільтруючого обладнання (ФО) відстійно-коалісцентного типу може бути установка типу СК-М, розроблена в СКБ «Океан».

Дане обладнання з доочистним фільтром типу ФДН відповідає вимогам Резолюції ІМО А.393 (X), а також МЕРС 60 (33) і експлуатується на морських суднах вітчизняного спорудження до поточного часу.

Виготовляється воно продуктивністю 1,0, 1,6 і 2,5 м<sup>3</sup>/год заводом «Балтія» (м. Клайпеда), а також суднобудівним заводом у м. Виборг (4 і 10 м<sup>3</sup>/год). Принципова схема сепараційної установки типу СК-2,5М продуктивністю 2,5 м<sup>3</sup>/год представлена на рис. 4.2.

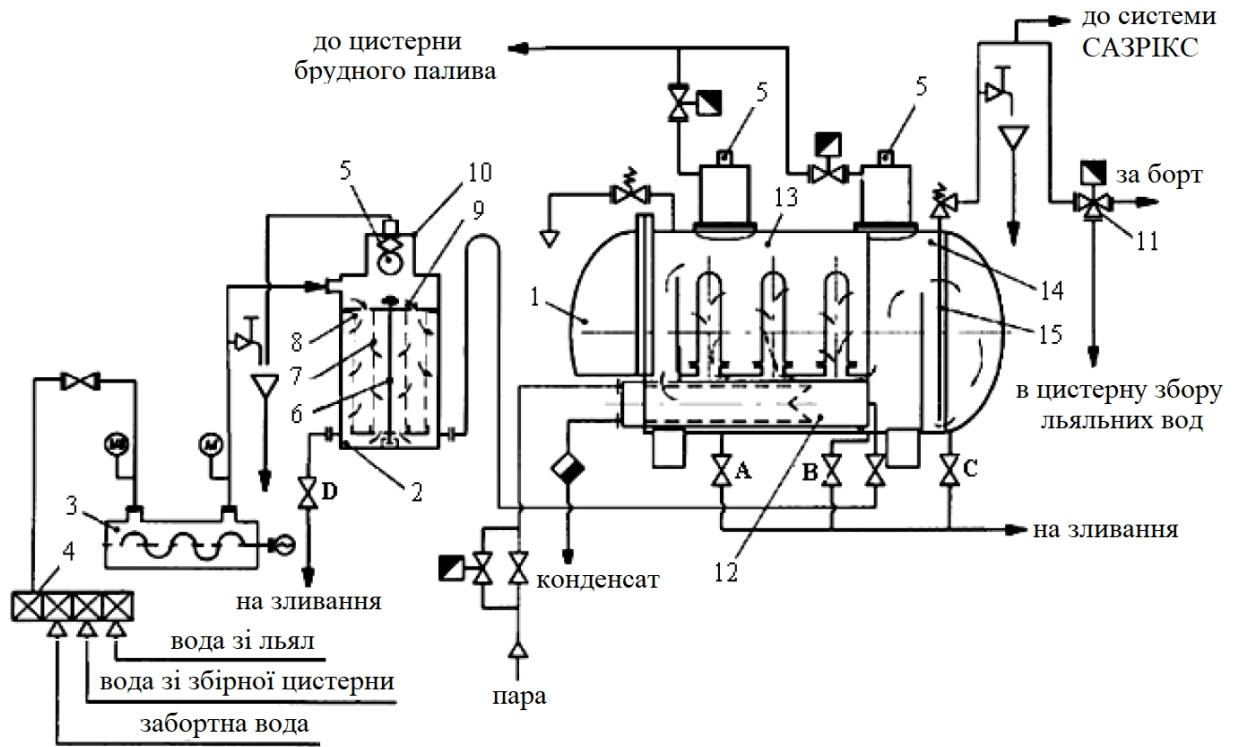


Рисунок 4.2 – Принципова схема сепараційної установки типу СК-М

На рис. 4.2 використано наступні позначення:

- 1 – сепаратор типу СК-2,5М;
- 2 – механічний фільтр;
- 3 – електрогвинтовий насос (ЕВН 3/5);
- 4 – клапанна розподільча коробка;

Тлумачення інших позначень рис. 4.2 наведені нижче за текстом. Очищувану воду насосом 3 подають в корпус механічного фільтра 2 і заповнюють його, витісняючи повітря через поплавковий клапан 5. Коли рівень води піднімає поплавок в камері 10 до упору, вихід повітря з фільтра закривається, а вода через отвори в горизонтальній пластині 9 опускається вниз між циліндричними збірками 7 і 8, які притиснуті до горизонтальної

полиці в корпусі фільтра через пластину 9 гайкою на трубі 6. Тут вода очищається від механічних домішок фільтруванням через вертикальні шари еластичного пінополіуретану (поролону), встановленого на латунних каркасах між сітками, і виходить з фільтра в сепаратор. Горизонтальний циліндричний корпус сепаратора 1 розділений вертикальною водонепроникною перегородкою на дві порожнини (13 і 14) і обладнаний двома нафтозбірниками з поплавковими повітряними клапанами 5, тому він перед використанням повинен завжди заповнюватися чистою забортною водою, а рівень її в нафтозбірнику – контролюватися за допомогою зливних клапанів. Неконтрольоване осушення корпусу призводить до забруднення нафтою його внутрішніх поверхонь плівкою НП, що опускається з нафтозбірника, і викликає збільшення концентрації в воді розчинених НП.

Сепаратори типу СК-М для судів, де в якості палива для СЕУ використовується мазут, обладнані змієвиковими паровими підігрівниками 12, що підвищують температуру середовища в корпусі до 40-50 °С перед її надходженням у відстійну порожнину першого ступеня очищення 13.

Очищена в сепараторі вода під дією внутрішнього тиску витісняється з порожнини сепаратора 14 по вертикальній трубі 15 через безповоротний клапан за борт судна, якщо система автоматичного виміру, реєстрації і керування скиданням (САЗРІКС) відкриває зливний триходовий електромагнітний клапан 11. При нафтовмісті у воді для скидання більше  $15 \text{ млн}^{-1}$  вищевказаний клапан закривається, і вода повертається в збірну цистерну для повторного очищення. Клапани А, В, С і D (рис. 4.2) призначені для осушення корпусу сепаратора 1 і механічного фільтра 2.

Аналізуючи склад принципової схеми установки типу СК-М (рис. 4.2), неважко помітити, що в процесі експлуатації установки в порожнині корпусу механічного фільтра 2 (поряд з очищенням нафтовмісної води від механічних домішок) неминуче має місце накопичення крапельних нафтопродуктів, відсепарованих гравітацією, зливання яких не передбачено. Коли рівень



накопичених нафтопродуктів досягає нижнього вихідного патрубка, вони з очищеною водою починають надходити в сепаратор, забруднюючи його коалісцентні фільтроелементи і значно зменшуючи їх ресурс. При цьому неминуче підвищення гідравлічного опору цих фільтроелементів. Тому апріорі можна стверджувати, що буде відбуватися продавлювання крапельних НП через пори термофікованого поліпропілену, що неминучо викликатиме їх деформацію і, як наслідок, вторинне їх емульгування.

На рис. 4.3 представлена конструкція коалісцентного фільтроелемента для сепараторів типу СК-М.

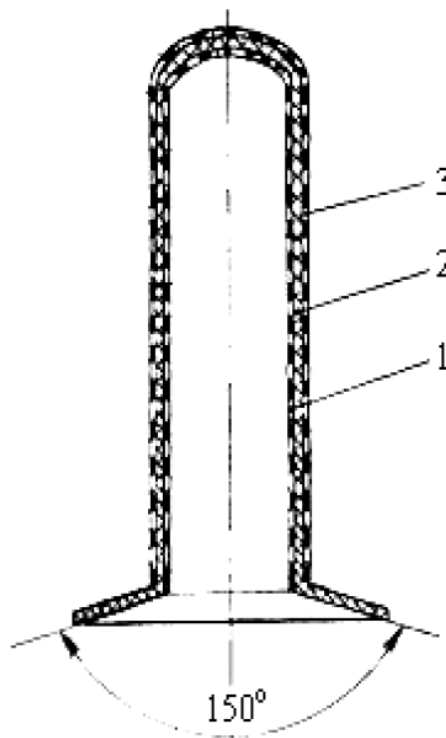


Рисунок 4.3 – Конструкція коалісцентного фільтроелемента на основі термофікованого поліпропілену

На рис. 4.3 позначення 1 – сталева перфорована обичайка; 2 – фільтраційний шар термофікованого поліпропілену товщиною 10 мм (отриманий шляхом напилення розплаву з подальшою термофікацією). Цей шар для сепараторів типу СК обмежений зовні сталевією перфорованою обичайкою 3, що оберігає його від розриву при можливому збільшенні

перепаду тиску при фільтруванні зсередини назовні (для сепараторів типу СКМ вона відсутня). Останнє може мати місце через зростання гідравлічного опору фільтроелемента при кальматації його пір асфальтенами і парафінами мазуту. У нижній частині шар поліпропілену має відбуртовку під кутом  $150^\circ$ , якою він прилягає до посадкового гнізда і притискається до нього квадратним фланцем за допомогою чотирьох гайок на шпильках. Висота фільтроелемента для сепараторів типу СК-1М, СК-1,6 м і СК-2,5М становить 450 мм, а для сепараторів СК-4М і 10М – 650 мм. Внутрішній діаметр для всіх типорозмірів ідентичний. При сталому режимі фільтрації кількість НП на вході в фільтроелемента дорівнює кількості НП на виході з його пір. У сепараторах типу СК-М товщина плівки НП на внутрішній утворювальній фільтроелемента згодом збільшується, вона починає переміщатися вгору, і поступово НП заповнюють всю внутрішню порожнину фільтроелемента. Фільтрація води при цьому відбувається через матеріал фільтроелемента і шар НП, що знаходиться всередині його. Це за задумом розробників повинно було б підвищувати ефективність очищення води від НП. Однак такого на практиці не відбувається. Частинки нафтовмісної емульсії, якщо вони виходять з пор коалісцентного матеріалу, при фільтрації через шар мазуту НЕ коалісцирують між собою. Вони зближуються (флокулюють), але не зливаються, поки між ними існує плівка води.

Сепаратори типу СК-М мали схвалення Регістру на  $100 \text{ млн}^{-1}$ , тому для підвищення якості очищення води (до  $15 \text{ млн}^{-1}$ ) вони дообладнувалися (на відливному трубопроводі установки) доочистними напірними фільтрами типу ФДН. На рис. 4.4 представлена конструкція такого фільтра продуктивністю  $1,6 \text{ м}^3/\text{год}$  для сепараторів типу СК-1,6М.

Тут в якості фільтруючого завантаження використовується утрамбована крихта (розмір часток 5-6 мм) з фенольно-формальдегідної смоли, отримана шляхом механічного подрібнення теплоізоляційної плити марки ФС 7-2-100 по ТУ 6-05-968-78. Ресурс завантаження залежить від

нафтовмісту очищуваної води, що надходить через патрубок 5. Чим вище нафтовміст, тим менше ресурс фільтруючого завантаження 4. Очищена вода на виході з патрубку 9 повинна постійно аналізуватися, щоб виключити викид НП за борт судна при заповненні нафтовмісного фільтруючого завантаження. Тому установки з фільтрами типу ФДН обов'язково мають в своєму складі прилад контролю якості очищення води або сигналізатор граничного нафтовмісту в скиданні.

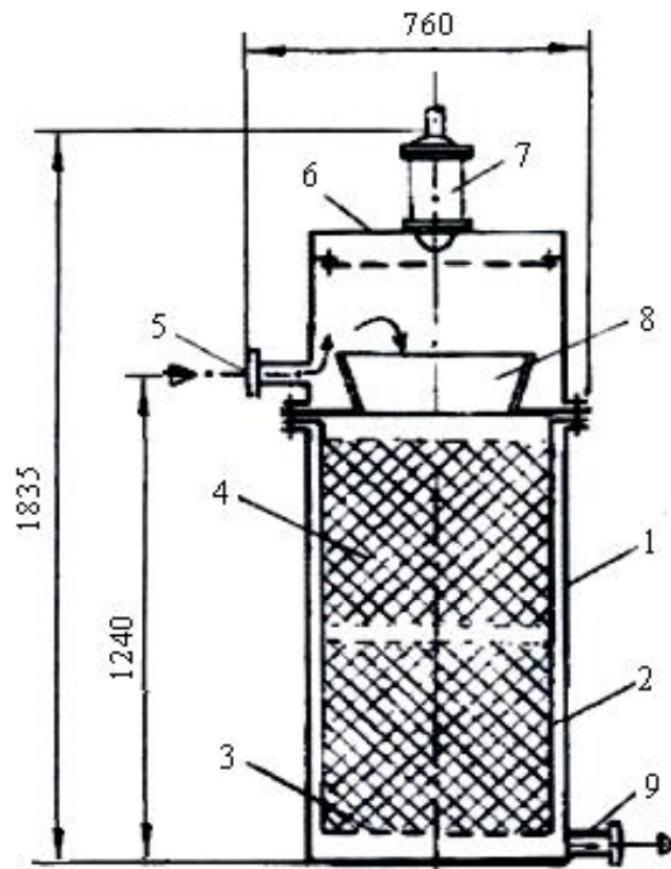


Рисунок 4.4 – Принципова схема фільтра типу ФДН для СК-1,6М

На рис. 4.4 використано наступні позначення:

- 1 – циліндричний корпус;
- 2 – внутрішній стакан;
- 3 – перфороване днище;
- 4 – фільтруюче завантаження;
- 5 – вхідний патрубок;

- 6 – кришка;
- 7 – камера повітряного поплавкового клапана;
- 8 – воронка;
- 9 – вихідний патрубок.

#### **4.4 Шляхи поліпшення роботи фільтруючого обладнання**

Аналіз технічної експлуатації фільтруючого обладнання ФО типу СК-М дозволив виявити деякі недоліки в конструкції цього обладнання:

- накопичення крапельних нафтопродуктів в корпусі механічного фільтра, що викликає надходження їх в сепаратор і неминуче забруднення коалісцентних фільтроелементів;
- пори коалісцентних фільтроелементів з термофікованого поліпропілену схильні до кальматації (замулювання) асфальтенами, парафінами і паливним шламом;
- при збільшенні гідравлічного опору на фільтроелемент зростає перепад тиску, що призводить до продавлювання крапель НП і викликає їх вторинне емульгування;
- фільтроелементи після забруднення важкими фракціями мазутів очистити неможливо, тому вони підлягають заміні та утилізації;
- паспортний ресурс штатних фільтроелементів становить не більше 50-100 год.

Фактично він набагато менше, якщо очищувальна вода містить мазут, концентрація якого перевищує  $250 \text{ млн}^{-1}$ .

Аналіз патентних матеріалів і досвід роботи ряду зарубіжних фірм з виробництва суднового фільтруючого обладнання показують, що необхідна розробка спеціальних коалісцентних матеріалів з широким діапазоном властивостей, основними з яких є висока ефективність деемульгування НП і

здатність матеріалу до регенерації. В даний час на морських судах широко використовуються важкі сорти органічного палива, густина яких досягає  $0,98 \text{ г/см}^3$ , тобто порівнянна з густиною води. НВС на основі такого палива не розділяються на основі сил гравітації навіть при нагріванні. Вказане значення густини частинок НВС перевищують середні значення густини НП, які застосовувались раніше при типових випробуваннях суднового обладнання нафтоводяної сепарації за програмою, обумовленою в Резолюції ІМО А.393 (X). Тому ФО типу СК-М не призначене для експлуатації на таких НВС.

Вступ в силу нових вимог МАРПОЛ, обумовлених Резолюцією ІМО МЕРС 107 (49) і прийнятих міжнародною спільнотою 18.07.2003 р., підвищують вимоги до методів проведення типових випробувань ФО для запобігання забруднення моря з суден.

Можливості вибору фільтруючого обладнання (ФО), що є найбільш важливим і невід'ємним компонентом осушувальної системи судна, дуже обмежені. Наявне обладнання в своїй більшості відстійно-коалісцентного типу і не може очищати воду від емульгованих НП. Ефективних схем реалізації технології очищення вод з точки зору ціни, якості, надійності і простоті обслуговування до цих пір немає.

Основним недоліком коалісцентного методу фільтрації є те, що відфільтровані НП з часом накопичуються в фільтрувальному матеріалі, забиваючи пори, знижуючи пропускну здатність і ефективність фільтрації, вимагаючи періодичного обслуговування (регенерації).

#### **4.4 Вимоги конвенції МАРПОЛ 73/78 щодо охорони морського середовища**

Умови скидання забруднених нафтою сумішей за борт суден валовою місткістю 400 реєстрових тон і більше відповідно до міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78.

Забороняється будь-яке скидання в море нафти або містить нафту суміші з суден, за винятком коли дотримуються одночасно всі наступні умови:

**1. З танкера газовоза:**

- танкер знаходиться поза межами особливих районів;
- танкер знаходиться на відстані більше 50 морських миль від найближчого берега;
- танкер знаходиться в дорозі;
- миттєва інтенсивність скидання нафти не перевищує 30 літрів на морську милю;
- загальна кількість скинутої з танкерів в море нафти не перевищує  $1/15000$  загальної кількості даного виду вантажу, частиною якого є залишок, а з нових танкерів –  $1/30000$  загальної кількості даного виду вантажу, частиною якого є залишок;
- на танкері знаходиться в дії система автоматичного виміру, реєстрації і керування скиданням нафти в відстійний танк.

**2. З льял машинного відділення танкера, за винятком льял відділення вантажних насосів, якщо тільки стоки машинних льял не змішаний з залишком нафтового вантажу:**

- танкер знаходиться поза межами особливих районів;
- танкер знаходиться в дорозі;
- вміст нафти в стоці без його розведення не перевищує 15 частин на мільйон.

На судні знаходиться в дії устаткування фільтрації нафти з обладнанням припиняє скидання в автоматичному режимі.

Скидання в море стічних вод заборонено, крім випадків коли:

1. Судно скидає подрібнені і знезаражені стічні води на відстані більше 4 морських миль від найближчого берега, або скидає неподрібнене і незнезаражені стічні води на відстані більше 12 морських миль від найближчого берега за умови, що в будь-якому випадку накопичені в збірних танках стічні води скидають відсотки не миттєво, а поступово, коли судно знаходиться в дорозі маючи швидкість не менше 4 вузлів.

2. На судні діє схвалена установка для обробки стічних вод, і стік не дає видимих плаваючих твердих частинок і не викликає зміни кольору навколишньої води; або

3. Судно знаходиться в водах, знаходиться під юриспруденцією будь якої держави, і скидаються стічні води відповідно до менш суворими вимогами, якого можуть бути встановлені цією державою.

Умови скидання сміття в територіальних водах і відкритому морі поза особливих районів відповідно до міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Умови скидання сміття в територіальних водах і відкритому морі поза особливих районів за міжнародною конвенцією МАРПОЛ 73/78

Категорія	Тип сміття	Скидання сміття в море (поза спеціальних зон)	Скидання сміття в море (в спеціальних зонах)
1	Пластик	Скидання заборонене	Скидання заборонене
2	Засоби запобігання від пошкодження	Більше, ніж в 25 милях від суходолу	Скидання заборонене

Продовження таблиці 4.1 – Умови скидання сміття в територіальних водах і відкритому морі поза особливих районів за міжнародною конвенцією МАРПОЛ 73/78

3	Папір, ганчірки	Більше, ніж в 3 милях від суходолу	Скидання заборонене
4	Залишки від вантажу, паперу і т.д.	Більше, ніж в 12 милях від суходолу	Скидання заборонене
5	Харчові відходи – подрібнені	Більше, ніж в 3 милях від суходолу	Більше, ніж в 12 милях від суходолу
	Харчові відходи – неподрібнені	Більше, ніж в 12 милях від суходолу	Більше, ніж в 12 милях від суходолу
6	Попіл від спалювання відходів	Скидання заборонене	Скидання заборонене
	Замаслене шмаття та інші нафтовмісні відходи	Скидання заборонене	Скидання заборонене



## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра розроблено систему керування електропривода суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples). В якості методу керування обрано частотне керування, а саме систему скалярного керування. В роботі наведено функціональну і структурну схеми даної системи керування.

В електроприводі суднового сепаратора «Гравітроль-1000» фірми Шарплес (Sharples) використано новий приводний асинхронний двигун RA132SB2 потужністю 7,5 кВт з частотою обертів 2890 об/хв і перетворювач частоти MOELLER модель MMX34AA014F0-0 потужністю 7,5 кВт.

В роботі розраховано параметри регуляторів розробленої системи скалярного керування та проведено аналіз динаміки системи. Отримано наступні показники якості керування: перерегулювання – 17 %, час перехідного процесу 0,35 с.

Також, розглянуто матеріали міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 по запобіганню забруднення з суден.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тё А.М. Судовые вспомогательные механизмы, системы и устройства / А.М. Тё. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. – 208 с.
2. Кузнецов С.Е. Основы эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации / С.Е. Кузнецов. – М.: Транспорт, 1991. – 231 с.
3. Овчинников И.Н. Судовые системы и трубопроводы / И.Н. Овчинников, Е.И. Овчинников. – Л.: Судостроение, 1988. – 312 с.
4. Харин В.М. Судовые сепараторы топлива и масла / В.М. Харин, Н.Н. Кобяков, Э.В. Корнилов. – Одесса: Латстар, 2001. – 104 с.
5. Системы судовых энергетических установок / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, А.Я. Шквар, В.П. Шостак. – Л.: Судостроение, 1990. – 376 с.
6. Трифонов Л.К. Судовой моторист / Л.К. Трифонов, В.И. Макаренко. – М.: Транспорт, 1975. – 296 с.
7. Бабаев А.М. Автоматизированные судовые электроприводы / А.М. Бабаев, В.Я. Ягодин. – М.: Транспорт, 1986. – 448 с.
8. Терехов В.М. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2004. – 296 с.
9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: «Академия», 2006. – 265 с.
10. Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 128 с.
11. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
12. Драчев Г.И. Теория электропривода. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 137 с.
13. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

14. Москаленко В.В. Электрический привод. – Москва: Академия, 2007. – 368 с.
15. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
16. Аркадьев В.Ю. Проектирование по теории автоматического управления / В.Ю. Аркадьев, А.И. Папченко, А.Г. Попруга, В.П. Боярчук. – Херсон: ХГТУ, 2002. – 272 с.
17. Международная конвенция МАРПОЛ. Книга III. СПб.: ЦНИИМФ, 2009. – 303 с.